



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

교육학박사 학위논문

역학 문제해결에 대한
동료교수 활동에서 고등학생의
모형구성 및 소집단 상호작용 분석

An Analysis of High School Students'
Modeling and Small Group Interactions
during Peer Instruction
in Solving Mechanics Problems

2018년 2월

서울대학교 대학원
과학교육과 물리전공
이 일

역학 문제해결에 대한
동료교수 활동에서 고등학생의
모형구성 및 소집단 상호작용 분석

지도교수 유 준 희

이 논문을 교육학박사 학위논문으로 제출함
2018년 1월

서울대학교 대학원
과학교육과 물리전공
이 일

이 일의 박사 학위논문을 인준함
2018년 1월

위 원 장 이 경 호 (인)

부위원장 조 광 희 (인)

위 원 최 승 언 (인)

위 원 채 승 철 (인)

위 원 유 준 희 (인)

국문초록

동료교수는 다년간의 양적 연구를 통해 학생들의 개념 변화와 성취도 향상에 기여하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 일각에서는 동료교수의 긍정적인 효과는 일방적인 정답과 풀이의 전수 때문이라는 의구심을 품고 있으며, 이러한 쟁점을 밝히기 위한 질적 연구의 필요성이 제기되고 있다. 최근에 대두되는 과학교수학습 방법으로써 모형구성은 학습자가 개념 세계를 활용하여 문제 상황의 설명 체계를 구성하는 과정으로 물리 문제해결을 이해함으로써 보다 질적인 관점을 제공할 수 있다. 특히, 역학은 여러 개념과 법칙들을 수학적으로 조직하여 물체의 운동을 기술하고 예측한다는 점에서 모형구성 관점으로 분석하기에 적합한 영역이다.

이에 본 연구는 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 동료와의 상호작용이 학생의 모형구성에 미치는 영향을 질적으로 탐색하여 학생의 학습에서 동료교수의 역할과 제한점에 대한 시사점을 제안하고자 한다. 이를 위해 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇이고, 문제해결을 위한 소집단 상호작용은 어떠한 양상으로 진행되며, 소집단 상호작용이 학생들의 모형구성에 미치는 영향은 어떠한지를 분석하였다.

서울시에 소재한 일반계 고등학교의 남학생 32명을 대상으로 물리 I 교육과정과 뉴턴 역학의 지식 구조를 고려하여 제작한 12개 선다형 문항에 대한 동료교수 수업을 90분씩 2차시 동안 진행하였다. 수업에서 참여자들은 먼저 개별적으로 문제를 풀고 교실응답시스템(Classroom Response System)에 접속하여 교사에게 답을 전송한다(응답 I). 교사가 가급적 답이 다른 참여자들로 모둠을 편성하여 고지하면 학생들은 모둠별로 모여 토론한 뒤 개별적으로 답을 전송한다(응답 II). 참여자들은 자신의 문제풀이 과정을 활동지에 기록하였으며, 95 사례의 담화가 녹화 후 전사되었다. 분석의 타당성을 확보하기 위해 전사 자료, 활동지, 관찰 일지 등이 활용되었다.

물리 문제에 대한 모형구성의 인지적 과정인 문제 상황 인식, 개념 세계 인출, 모형 생성 등의 하위 범주인 기술자 식별, 개념 모형 선택, 분면 형성, 수학적 조작 및 타당화로 분석틀을 구성하여 참여자들의 모형구성을 유형화하였다. 응답 I 에서 총 12개 문항에 대한 372건의 모형구성 사례가 6가지 유형으로 범주화되었으며 각 유형은 다음과 같다. 모형의 모든 분면을 타당하게 구성(37.9%), 모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함(0.5%), 모든 분면을 구성하였으나 일부 분면의 타당성 결여(24.2%), 일부 분면만을 구성(11.8%), 부적절한 개념 모형 선택(3.8%), 직관이나 추측에 의한 해의 선택(14.5%) 등이다. 유형화가 불가능한 사례는 27건이었다. 각 문항별로 동일한 유형의 모형구성을 한 참여자들의 일관된 특징을 식별하여 모형구성에서의 어려움을 분석한 결과, 참여자들은 상호작용 기술자를 식별하거나 어떤 상호작용 기술자를 인과 분면 구성에 적용할 것인가에 대한 어려움을 노출하였다. 또한 일부 참여자들은 문제 상황에 대한 숙고 없이 익숙한 개념 모형을 임의로 선택하거나 모형구성의 각 단계마다 계의 설정을 달리 적용하는 것으로 나타났다.

동료교수에서 참여자들의 소집단 상호작용을 모둠 내에 대응된 모형을 구성한 모둠원의 수, 모둠원의 역할, 모형의 동질성, 모형의 변화 등의 측면에서 분석한 결과, 튜터링, 경쟁, 협업 및 양립성 확인의 네 가지 양상으로 범주화하였다. 총 118건의 소집단 상호작용은 피교수자 역할을 하는 참여자가 교수자 역할을 하는 참여자의 모형을 일방적으로 수용하는 튜터링(54.2%), 상이한 구조의 모형을 생성한 참여자들이 대등한 입장에서 서로의 모형을 평가하고 합의를 시도하는 경쟁(17.8%), 문제 상황과 모형에 관한 정보를 공유함으로써 공동으로 모형을 수정하거나 새로운 모형의 구성을 시도하는 협업(10.1%), 대응된 모형을 구성한 참여자들이 모형들의 타당성을 인정하고 유사성과 차이점을 확인하는 양립성 확인(17.8%) 등의 양상으로 분류되었다.

마지막으로 문제 상황, 개념 세계 및 모형에 대한 소집단 상호작용이

참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 사례 분석하였다. 튜터링과 경쟁의 참여자들은 동료의 모형을 수용하거나 평가하는 과정에서 본인의 모형과 문제 상황 인식의 문제점을 인지하고 이를 수정하는 것으로 확인되었다. 그러나 개념 세계의 결핍이나 모순을 가진 참여자가 개념 세계에 대한 상호작용 없이 동료의 결과적 모형만을 수동적으로 수용할 경우 문제 상황 인식, 개념 세계 및 모형의 내적 일관성이 결여되는 것으로 나타났다. 협업은 모두의 특성에 따라 모형구성에 미치는 영향이 상이하였다. 모두 내에 모형을 생성한 참여자가 있는 경우 모두원들은 문제 상황 인식을 공유하여 기존의 모형을 수정하였다. 그러나 모형을 생성하지 못한 참여자들로만 모두가 편성된 경우 대부분의 사례에서 모형 생성과 해의 도출에 실패하였다. 양립성 확인에서 참여자들이 모형의 유사성과 차이에 대한 개념적 논의보다는 상대방의 모형을 확인하는데 그친 경우가 해당 양상의 75%가 넘었다. 이는 대부분의 참여자들이 양립성 확인을 통해 모형과 개념 세계의 확장을 경험하지 못한 것으로 해석할 수 있다.

결론적으로 동료교수 활동에서 참여자들은 동료 참여자의 문제 상황 인식 또는 모형을 수용, 평가, 공유하는 등의 소집단 상호작용을 통해 자신의 모형을 수정하거나 생성하는데 도움을 받는다고 할 수 있다. 그러나 개념 모형에 대한 참여자들의 이해가 현저히 부족하거나 개념적인 논의가 생략된 채 모형의 결과와 단편적인 지식만이 일방적으로 전달되면, 소집단 상호작용은 단지 수학적 계산과정을 전수하는데 그칠 개연성이 높다. 이는 동료교수 활동이 학생들의 물리학습에 더욱 의미 있게 기여하기 위해서는 능동적인 상호작용을 통해 모형과 개념 세계의 연계성을 이해하는 것이 중요함을 시사한다. 동료교수 활동 중 학생들이 공식의 조합과 계산과정에만 주목하지 않고 과제의 물리적인 의미와 이론에 대해서도 논의하도록 격려하는 교수 방안에 대한 추후 연구가 필요하다.

주요어 : 물리 문제해결, 모형구성, 소집단 상호작용, 역학

학 번 : 2012-30408

목 차

초 록	i
목 차	iv
표 목차	vii
그림 목차	ix
1. 서론	1
1.1. 연구의 배경	1
1.2. 연구의 목적	4
1.3. 연구과정의 개요	5
1.4. 용어의 정의	7
1.4.1. 역학	7
1.4.2. 개념 세계	7
1.4.3. 모형	8
1.4.4. 모형구성	8
1.4.5. 동료교수	10
1.4.6. 소집단 상호작용	10
1.5. 연구의 한계	11
2. 선행 연구와 이론적 논의	13
2.1. 뉴턴 역학	13
2.1.1. 뉴턴 역학의 규칙	13
2.1.2. 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조	19
2.1.3. 중등 교육과정의 뉴턴 역학	25
2.2. 물리 문제해결	30

2.2.1. 물리 문제해결의 의의	30
2.2.2. 물리 문제해결에서 학생들이 겪는 어려움	32
2.3. 모형구성	40
2.3.1. 모형(Model)과 모형구성	40
2.3.2. 모형구성과 물리 문제해결	45
2.3.3. 모형구성의 분석틀	51
2.4. 동료교수와 소집단 상호작용	67
2.4.1. 동료교수	66
2.4.2. 물리 문제해결에서 동료교수의 효용성	68
2.4.3. 소집단 상호작용의 양상	70
3. 연구 방법	77
3.1. 연구 대상	77
3.2. 수업의 구성	78
3.2.1 수업의 흐름	78
3.2.2. 문항의 제작	79
3.2.3. 문항 정답률	86
3.2.4 모둠의 정답 분포 변화	87
3.3. 자료 수집	90
3.4 자료 분석	91
3.4.1. 모형구성의 분석틀	91
3.4.2. 소집단 상호작용 양상 분류	92
3.4.3. 소집단 상호작용이 모형구성에 미치는 영향	94
4. 결과 및 논의	96
4.1. 모형구성의 유형과 어려움	96
4.1.1. 모형구성 유형	96
4.1.2. 모형구성에서 학생들의 어려움	110

4.2. 소집단 상호작용의 양상	136
4.2.1. 소집단 상호작용의 양상 분류	136
4.2.2. 문항별 소집단 상호작용 양상 빈도	146
4.3. 소집단 상호작용이 모형구성에 미치는 영향	150
4.3.1. 튜터링	150
4.3.2. 경쟁	166
4.3.3. 협업	172
4.3.4. 양립성 확인	178
5. 결론	183
5.1. 요약	183
5.2. 결론 및 제언	187
참 고 문 헌	188
부 록	200
Abstract	213

표 목차

[표 2-1] Newtonian 모델링 게임의 규칙(Hestenes, 1992).....	15
[표 2-2] 뉴턴 역학을 정의하는 법칙(Hestenes, 1992).....	16
[표 2-3] 등가속도 운동에 대한 뉴턴 역학의 대응 규칙(Halloun, 2004).....	17
[표 2-4] 뉴턴 역학의 기본 모형(Halloun, 2006).....	21
[표 2-5] 본 연구의 계에 관한 일반 규칙	25
[표 2-6] 뉴턴 역학 관련 중학교와 고등학교 과학 성취기준(2011년 고시).....	26
[표 2-7] 뉴턴 역학 관련 물리 I, 물리II 성취기준(2011년 고시)	27
[표 2-8] 중등학교 교육과정에서 다루는 뉴턴 역학의 지식 구조	28
[표 2-9] 초심자와 전문가의 지식 비교(권재술, 이성왕, 1988).....	39
[표 2-10] 역학에서의 모형구성 단계(Hestenes, 1987)	52
[표 2-11] 모형 구성 요소의 세부 항목과 정의(Lopes & Costa, 2007)	54
[표 2-12] 본 연구와 선행 연구의 모형구성 과정 비교	63
[표 2-13] 모형구성 분석틀의 단계	64
[표 2-14] 동료교수의 기본 모듈(장혜원, 2014)	68
[표 2-15] 동료교수에서 비표준 대화(James & Willoughby, 2011)	71
[표 2-16] 담화 유형 분류틀(Hogan et al, 1999)	73
[표 2-17] 소집단 모델발달 유형과 상호작용 특성(이신영 외, 2012)	74
[표 3-1] 문제 상황과 평가 요소	80
[표 3-2] 뉴턴 역학의 지식 구조에 따른 문항 분석	83
[표 3-3] 문항 정답률	86
[표 3-4] 모듈의 정답 분포 변화	88
[표 3-5] 소집단 상호작용 양상 범주화 기준.....	93
[표 4-1] 본 연구 참여자들의 모형구성 유형	108
[표 4-2] 1번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	111
[표 4-3] 2번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	113
[표 4-4] 3번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	115
[표 4-5] 4번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	117
[표 4-6] 5번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	119
[표 4-7] 6번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	120
[표 4-8] 7번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	122
[표 4-9] 8번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	124

[표 4-10] 9번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	126
[표 4-11] 10번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	128
[표 4-12] 11번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	130
[표 4-13] 12번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	132
[표 4-14] 각 문항별 모형구성의 어려움	132
[표 4-15] 소집단 상호작용의 양상.....	146
[표 4-16] 소집단 상호작용 양상의 빈도(N=118)	148

그림 목차

[그림 1-1] 연구과정의 개요	6
[그림 2-1] 과학적 패러다임의 조직(Halloun, 2006)	15
[그림 2-2] 대상과 동인, 계와 환경(Halloun, 2006)	18
[그림 2-3] 뉴턴 역학의 위계(Van Heuvelen, 1991)	20
[그림 2-4] 역학 분야의 지식 유형(Reif & Heller, 1982)	22
[그림 2-5] 역학의 지식 유형별 하위 범주(Reif & Heller, 1982)	23
[그림 2-6] 본 연구의 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조	24
[그림 2-7] 물리적 의미를 수학으로 사상(Tuminaro & Redish, 2007)	34
[그림 2-8] 수학으로의 음역에 대한 도식(Tuminaro & Redish, 2007)	35
[그림 2-9] GEM 순환 (Clement, 2008)	45
[그림 2-10] 실제 세계의 매개체로써의 모형(Giere, 1990)	47
[그림 2-11] 모형구성 관점에서 해석한 물리 문제해결 과정	48
[그림 2-12] 모형과 물리적 현상의 관계(Hestenes, 1992)	49
[그림 2-13] 모형구성 능력 요소(Lopes & Costa, 2007)	53
[그림 2-14] 모형구성으로써 문제해결(Niss, 2012)	57
[그림 2-15] 모형구성 요소와 학습자의 인지적 과정	58
[그림 2-16] 본 연구의 모형구성의 분석틀	62
[그림 2-17] 모형구성 분석틀의 각 단계와 모형구성 요소와의 관계	65
[그림 2-18] 모형구성 요소의 상호작용	75
[그림 3-1] 수업의 흐름	79
[그림 3-2] 모형구성 요소의 상호작용 예시	95
[그림 4-1] 모형 분면을 타당하게 구성하고 타당한 해를 구한 유형	97
[그림 4-2] 2번 문항에 대한 S4의 모형구성	98
[그림 4-3] 모든 분면을 타당하게 구성했으나 계산 오류를 범한 유형	99
[그림 4-4] 4번 문항에 대한 S4의 모형구성	100
[그림 4-5] 일부 분면의 타당성이 결여된 유형	101
[그림 4-6] 7번 문항에 대한 S8의 모형구성	102
[그림 4-7] 일부 분면만을 구성한 유형	103
[그림 4-8] 8번 문항에 대한 S13의 모형구성	104
[그림 4-9] 부적절한 개념 모형을 선택한 유형	105
[그림 4-10] 11번 문항에 대한 S25의 모형구성	106

[그림 4-11] 비과학적인 직관이나 추측을 통해 해를 선택한 유형	107
[그림 4-12] 1번 문항에 대한 S20의 모형구성	107
[그림 4-13] 전체 문항의 모형구성 유형 분포와 정답률 비교	109
[그림 4-14] 1번 문항의 모형구성 유형 분포	110
[그림 4-15] 2번 문항의 모형구성 유형 분포	112
[그림 4-16] 3번 문항의 모형구성 유형 분포	114
[그림 4-17] 4번 문항의 모형구성 유형 분포	116
[그림 4-18] 5번 문항의 모형구성 유형 분포	118
[그림 4-19] 6번 문항의 모형구성 유형 분포	119
[그림 4-20] 7번 문항의 모형구성 유형 분포	121
[그림 4-21] 8번 문항의 모형구성 유형 분포	123
[그림 4-22] 9번 문항의 모형구성 유형 분포	125
[그림 4-23] 10번 문항의 모형구성 유형 분포	127
[그림 4-24] 11번 문항의 모형구성 유형 분포	129
[그림 4-25] 12번 문항의 모형구성 유형 분포	131
[그림 4-26] 6번 문항 8조의 모형구성 유형 변화(튜터링)	137
[그림 4-27] 3번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(경쟁-합의)	139
[그림 4-28] 9번 문항 4조의 모형구성 유형 변화(경쟁-고수)	140
[그림 4-29] 6번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(협업)	142
[그림 4-30] 1번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(양립성 확인)	144
[그림 4-31] 튜터링에 참여한 교수자와 피교수자(A2)의 모형구성 비교	152
[그림 4-32] 튜터링에 참여한 S15와 S18의 상호작용과 모형구성 변화	152
[그림 4-33] 튜터링에 참여한 S17과 S20, S22의 상호작용과 모형구성 변화 ·	156
[그림 4-34] 튜터링에 참여한 교수자와 피교수자(ID)의 모형구성 비교	161
[그림 4-35] 튜터링에 참여한 S10과 S8의 상호작용과 모형구성 변화	162
[그림 4-36] 튜터링에 참여한 S19와 S11의 상호작용과 모형구성 변화	164
[그림 4-37] 경쟁에 참여한 S17(A4)과 S13, S31(A2)의 모형구성 비교	167
[그림 4-38] 경쟁에 참여한 S17과 S13, S31의 상호작용과 모형구성 변화 ...	168
[그림 4-39] 경쟁에 참여한 S9(A4)와 S28(A2)의 모형구성 비교	170
[그림 4-40] 경쟁에 참여한 S9와 S28의 상호작용	172
[그림 4-41] 협업에 참여한 S1의 모형구성 변화	174
[그림 4-42] 협업에 참여한 S23과 S21의 상호작용과 모형구성 변화	175

[그림 4-43] 협업에 참여한 S29와 S7의 상호작용과 모형구성 변화	177
[그림 4-44] 양립성 확인에 참여한 S21과 S9의 모형구성 비교	179
[그림 4-45] 양립성 확인에 참여한 S21과 S9의 상호작용과 모형구성 변화 ..	180

1. 서론

1.1. 연구의 배경

물리 문제해결은 개념의 이해와 습득(Van Heuvelen, 1991; Hsu *et al.*, 2004), 평가(Hestenes *et al.*, 1992; Hestenes & Wells, 1992), 물리학의 절차적 지식 습득(Larkin & Reif, 1979; 권재술, 이성왕, 1994; Henderson *et al.*, 2004; Hsu, *et al.*, 2004), 일반적인 영역에서의 문제해결 능력 증진 등을 목적으로 물리교육에서 광범위하게 활용되는 교수학습 전략이자 도구이다. 그동안 많은 교사들이 물리 문제를 잘 푸는 것이 물리를 잘하는 것이라는 믿음 하에 학생들에게 다양한 문제해결 경험을 요구해왔다(de Ataíde & Greca, 2013). 그러나 대다수의 학생들은 물리 문제해결을 어려워하며(Kim & Lee, 2006; Lim & Lee, 2013) 물리 문제해결 과정을 통해 의미 있는 추론을 하지 못하고 수학적 계산과정을 익히는데 주력하고 있는 실정이다(Hestenes, 1997; Redish *et al.*, 1998; Halloun, 2006; Mason & Singh, 2010). 이로 인해 물리학의 매력을 느끼는 학생들조차 물리 문제해결의 어려움 때문에 물리학을 기피하고 있는 실정이다(Angell *et al.*, 2004).

한편, 동료교수는 물리 문제해결 과정에서 동료와의 상호작용을 활성화함으로써 학생들의 개념 이해 수준을 향상시키고 수업의 참여도를 높이기 위한 교수 모형이다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001). Mason & Singh, 2010). 동료교수에 관한 선행 연구들은 학생들의 개념 이해, 문제해결 능력, 수업 참여도, 효과적인 문제해결 전략 사용 등에 긍정적인 효과가 있음을 일관성 있게 보고한다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001; Smith *et al.*, 2009; Mason & Singh, 2010). 동료교수는 10년 이상의 광범위한 현장 연구를 통해 동료와의 상호작용이 물리 문제해결의 어려움을 극복하고 물리 학습에서 문제해결의 본래 취지를 되새기

는데 긍정적인 기여를 한 것으로 평가받고 있다. 그러나 학생들의 성취도 평가가 지나치게 정량적이고 개념 검사 위주이며, 학생들의 상호작용이 학습에 미치는 영향에 대한 인지적인 분석이 부족하다는 비판의 목소리도 존재한다(James & Willoughby, 2011; Wood *et al.*, 2014). 또한 일각에서는 동료교수의 긍정적인 효과는 상위 수준 학생으로부터 하위 수준의 학생으로 일방적인 전수(transmission)에 의한 것이라는 의구심을 품고 있다(James & Willoughby, 2011). 이러한 지적은 동료교수에서 학생들의 상호작용에 대한 질적 분석이 부족한데서 비롯된다고 할 수 있다(Enghag *et al.*, 2007).

동료와의 상호작용에 대한 질적 분석이 부족했던 이유를 문제해결에 대한 연구자들의 인식에서 찾을 수 있다. 학습자의 문제해결에 대한 기존의 연구들은 정보 처리 이론에 입각하여 초보자인 학생도 전문가의 해결 과정을 잘 학습하면 문제해결을 잘할 수 있을 것이라는 신념을 바탕으로 초보자와 전문가의 문제해결과정을 비교하는 방식이 많았다(Simon & Newell, 1971; 권재술, 이성왕, 1988, Henderson *et al.*, 2004). 이러한 시도는 학생들이 얼마나 효율적이고 적합하게 문제해결 전략을 수립하느냐로 귀결되어 그동안 많은 연구들이 다양한 방식의 문제해결 전략의 도입과 효능에 대해 이루어졌다(Byun *et al.*, 2010; Van Heuvelen, 1991; Heller *et al.*, 1992). 이러한 접근은 학생들의 인지적 도식을 고려하지 않고 일괄적인 지식의 습득에 중점을 두었으로써(James & Willoughby, 2011) 학생들이 물리 문제를 해결해가는 다양하고 복잡한 인지적 과정에 대한 정보를 세밀하게 제공하지 못했다. 이로 인해 동료와의 협동 혹은 협업도 문제해결전략의 일환으로 간주되어 동료와의 상호작용이 학생들의 학습에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 질적인 측면보다는 정량적인 검사 결과에 초점을 맞춘 연구가 주를 이루게 된 것으로 보인다(Lee & Yoo, 2017).

최근에 대두되는 과학교수학습에서 모형구성은 물리 문제해결을 개념 세계를 활용하여 문제 상황에 대한 설명 체계를 구성하는 과정으로 이해

함으로써 물리 문제해결에 관한 보다 질적인 관점을 제공한다(Hestenes, 1987, 1997; Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007; Brew, 2008). 즉, 물리 문제해결은 학습자가 사전에 학습한 개념과 개념 모형들을 적용하여 문제 상황에 대한 모형을 생성하고 이를 통해 해를 도출하는 모형구성으로 볼 수 있다. 학습자들은 물리 문제에 대한 모형구성을 통해 개념 모형의 모호함을 시정하고 명료화함으로써 개념 모형과 과학 이론을 더욱 폭넓게 이해하게 된다(White & Frederiksen, 1990; Halloun, 2006). 이러한 모형구성의 관점은 물리 문제해결이 단지 수학적 풀이를 통해 답을 찾는 행위 이상의 과학적 방법론으로서의 가치를 강조한다. 또한 정답의 옳고 그름과 같은 피상적인 분류에서 벗어나 문제해결 과정에서 나타나는 학생들의 복잡하고 역동적인 인지 과정을 세밀하게 기술할 수 있는 이론적인 틀을 제공할 것으로 기대된다.

역학은 물리학의 보편적이고 기본적인 도구와 규칙을 제공하고 개념과 법칙들을 수학적으로 조직하여 물체의 운동을 기술한다는 점에서 모형구성 연구들에서 가장 많이 다룬 물리학의 영역이다(Hestenes 1987; 1997, Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007; Clement, 2008; Brew, 2008; Bae & Yoo, 2012; Lee & Yoo, 2017). 따라서 물리 문제해결 과정을 모형구성의 관점에서 분석하기에 적합한 영역이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 고등학생들의 물리 문제해결 과정과 소집단 상호작용을 모형구성의 관점에서 분석하여 동료와의 상호작용이 학생의 모형구성에 미치는 영향을 탐색하고자 한다.

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 동료와의 상호작용이 학생의 모형구성에 미치는 영향을 질적으로 탐색하여 학생의 학습에서 동료교수의 역할과 제한점에 대한 시사점을 제안하는데 있다. 이를 위해 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇이고, 문제해결을 위한 소집단 상호작용은 어떠한 양상으로 진행되며, 소집단 상호작용이 학생들의 모형구성에 미치는 영향은 어떠한지를 분석하였다. 이에 관한 구체적인 연구 문제는 다음과 같다.

1. 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇인가?
2. 동료교수 활동에서 고등학생들의 소집단 상호작용 양상은 어떻게 범주화되는가?
3. 고등학생들의 소집단 상호작용 각 유형이 역학 문제에 관한 모형구성에 미치는 영향은 무엇인가?

1.3 연구과정의 개요

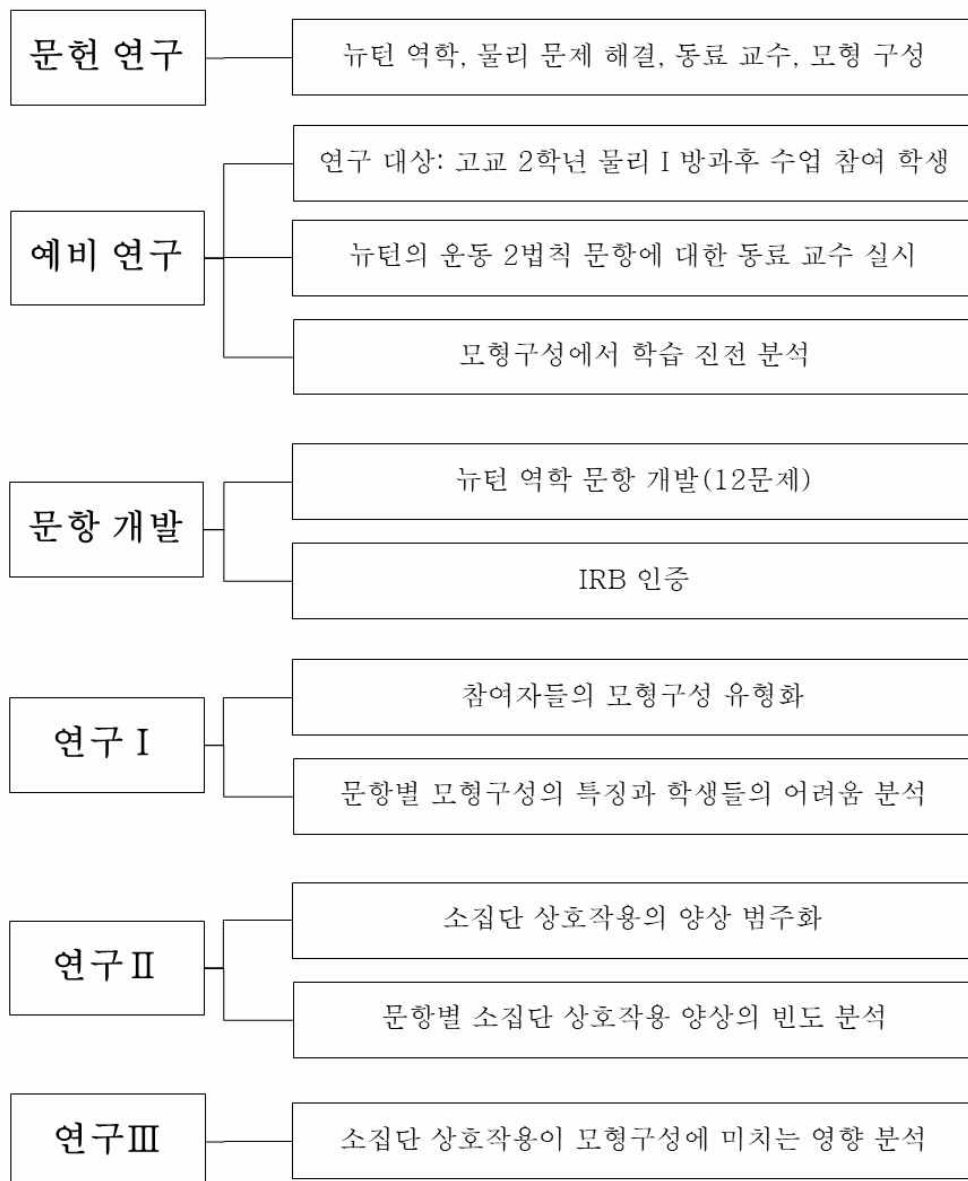
본 연구를 실시하기에 앞서 뉴턴 역학, 물리 문제해결에서 학생들이 겪는 어려움과 특징, 동료교수의 효용성, 물리 문제해결에서 소집단 상호작용의 양상 등에 대한 선행 연구를 조사하였다. 그리고 과학적 모형과 모형구성에 대한 이론적 고찰을 통해 모형구성 관점에서 물리 문제해결 과정을 인지적으로 분석하기 위한 이론적인 틀을 고안하였다. 이를 바탕으로 경기도에 소재한 일반계 고등학교에 개설된 물리 I 방과 후 수업을 수강하는 학생 20명(남 13명, 여 7명)을 대상으로 예비 연구를 진행하였다. 동료교수 활동에서 나누는 학생들의 담화와 작성된 활동지를 분석하여 모형구성에 대한 학습 발달과정(learning progression)을 분석하였다. 예비 연구 결과 동료교수 활동이 정답의 일방적 전달을 넘어 물리적 대상 및 상황에 대한 이론적 설명과 모형 구성에서의 학습 진전(learning advancement)에 기여함을 확인할 수 있었다.

예비 연구에서 사용한 문항을 기초로 고등학교 물리 I 교육과정과 뉴턴 역학의 지식구조를 반영하여 본 연구에서 사용할 12개의 선다형 문항을 제작하였다. 고등학교에서 물리 I 을 수강하는 일반계고 학생들을 대상으로 예비 검사를 실시한 뒤 물리교육 전문가 3인의 검토를 거쳐 문항과 활동지를 수정·보완하였다. 연구 계획에 대한 IRB 인증을 획득한 이후 서울시에 소재한 인문계 고등학교 학생들을 대상으로 연구 참가자를 모집하였다.

연구에 자발적으로 참여 의사를 밝힌 일반계 고등학교 남학생 32명을 대상으로 90분씩 2차시 동안 동료교수를 적용한 수업을 진행하였다. 연구 I 에서는 동료교수 활동 학생들이 작성한 활동지와 담화 자료를 분석하여 학생들의 모형구성을 유형화하였다. 각 문항별 학생들의 모형구성 유형의 분포와 특징을 기술한 뒤 학생들이 모형구성에서 겪는 어려움을 분석하였다.

연구 II에서는 참여자들의 소집단 상호작용 양상을 모둠 내에 대응된 모형을 구성한 모둠원의 수, 모둠원의 역할, 모형의 동질성, 모형의 변화 측면을 기준으로 범주화하였다.

연구 III에서는 소집단 상호작용에서 문제 상황, 개념 세계 및 모형에 대한 상호작용이 참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 사례 분석하였다.



[그림 1-1] 연구과정의 개요

1.4 용어의 정의

1.4.1. 역학(Mechanics)

본 연구에서의 역학은 뉴턴에 의해 집대성된 17세기까지의 뉴턴 역학을 의미하며 세 가지 운동 법칙과 만유인력 법칙으로 대표된다(French, 1971). 역학의 내용 범위는 중학교 과학의 힘과 관련과 내용, 고등학교 물리 I 교육과정에서 다루는 시간과 거리, 속도와 가속도, 세 가지 운동 법칙, 운동량과 충격량 등으로 한정되었다.

1.4.2. 개념 세계(Conceptual world)

본 연구에서는 개념 세계를 개념 모형을 중심으로 과학적 이론, 법칙, 개념 등이 체계적으로 구조화되어 있는 것으로 이해하였다. 개념 모형이란 과학적 이론에서 다루는 전형적인 현상에 대한 외적 표상으로(Nersessian, 1999) 개념들의 관계를 규정지음으로써 이론의 하부 요소를 구성한다(Hestenes, 1997; Greca & Moreira, 2002, Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007; Brewe, 2008). 개념 모형은 공동체의 과학적 지식과 일치하며 수학적 공식이나 비유(analogy), 물질적인 인공물(material artifacts)로써 구체화된다(Greca & Moreira, 2002, Halloun, 2006). 역학의 대표적인 개념 모형으로 등가속도 운동 모형을 들 수 있으며 $v = v_0 + at$, $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ 와 같은 수학적 공식을 통해 속도, 가속도, 변위 등의 관계가 규정된다.

1.4.3. 모형(Model)

모형에 대한 정의는 학자들마다 분분하며 여러 학계에서 다양한 의미로 사용되고 있다. 그러나 모형이 다양한 표상을 통해 현상과 대상을 대리하고 이들의 상태를 기술하고 설명한다는 점은 공통적이다. 따라서 본 연구에서는 모형을 문제 상황을 기술하고 설명하기 위한 설명 체계로 이해하였다. 모형은 세부적으로 물체의 상태 변화를 기술하는 상태 분면, 대상에 작용하는 상호작용 간의 관계를 기술하는 상호작용 분면, 상호작용에 의한 물체의 상태 변화를 인과적으로 설명하는 인과 분면, 문제의 해(answer) 등으로 구성된다.

1.4.4. 모형구성(Modeling)

학습자들의 물리 문제해결 과정은 해를 구하기 위해 개념들을 조직하여 문제 상황에 관한 설명 체계를 구성한다는 점에서 모형구성으로 이해할 수 있다(Hestenes, 1987, 1997; Brewster, 2008; Niss, 2012). 이에 본 연구에서는 물리 문제해결을 학습자가 사전에 가지고 있던 개념 세계를 기반으로 문제 상황에 대한 설명 체계, 즉 모형을 생성해가는 모형구성으로 정의하였다. 물리 문제에 대한 모형구성은 문제 상황, 개념 세계, 모형 등의 세 가지 요소에 관한 다음의 인지적 과정을 통해 구체화된다.

1) 문제 상황 인식(Problem situation recognition)

문제 상황 인식은 학습자가 문제에서 제시한 정보들을 바탕으로 문제 상황의 물체들을 대상(object)과 동인(agent)으로 구분하여 모형의 계를 설정하고 계에 속한 대상의 상태 변화와 상호작용을 관련 개념의 표상인

기술자(descriptor)로 인지하고 이를 식별하는 과정이다.

2) 개념 세계 인출(Conceptual world retrieval)

개념 세계 인출은 계의 상태를 기술하고 설명하기 위해 학습자가 자신의 개념 세계에서 가장 적합한 개념 모형을 선택하는 것을 의미한다. 어떤 개념 모형을 선택하는가에 따라 개념들의 관계가 다르게 규정되므로 개념 모형 선택은 단순한 공식의 상기가 아니라 계의 특성에 부합되도록 개념들의 관계를 설정하는 과정으로 이해할 수 있다(Halloun, 2006; Lopes & Costa 2007).

3) 모형 생성(Model generation)

본 연구에서 모형 생성은 계의 상태와 상호작용 기술자들을 적절한 개념 세계의 요소들과 연관 지어 모형을 생성하는 일련의 과정을 의미한다. 모형은 계의 운동 상태 변화를 기술하는 상태 분면, 계에 작용하는 상호작용 간의 관계를 기술하는 상호작용 분면, 상호작용에 의한 계의 상태 변화를 인과적으로 설명하는 인과 분면 등을 형성함으로써 그 구조가 구체화된다고(Halloun, 2006). 분면이 형성되면 학습자는 초기 조건들을 각 분면에 적용하여 문제 상황에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용, 특성 등과 관련된 해를 수학적 조작을 통해 도출한다. 마지막으로 학습자는 분면 간의 일관성과 같은 내적 요인, 문제의 보기와 해의 일치 여부와 같은 외적 요인을 기준으로 모형의 타당성을 검증한다(Niss, 2012; Lee & Yoo, 2017).

1.4.5. 동료교수(Peer instruction)

동료교수(peer instruction)는 동료와의 소집단 상호작용을 통해 학생들의 수업 참여와 개념 이해 수준을 높이하고자 한 물리 문제해결과 관련된 대표적인 수업 모형이다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001).

본 연구에서는 동료교수는 다음과 같은 절차로 진행된다. 학생들은 먼저 개별적으로 선다형 문제를 풀 뒤에(응답 I) 교실응답시스템(Classroom Response System)에 접속하여 자신이 선택한 보기를 교사에게 전송한다. 교사는 가급적 답이 다른 학생들로 모둠을 편성하여 이를 개별 공지한다. 학생들은 모둠별로 모여 문항에 대한 각자의 풀이와 답에 대해 토론한 후, 원래 자리로 돌아와 개별적으로 교사에게 답을 전송한다(응답 II).

1.4.6. 소집단 상호작용(Small group interaction)

본 연구에서 소집단 상호작용은 문제해결에 관한 동료교수 활동에서 학생들의 담화와 제스처, 활동지의 교환 등의 의사소통 행위를 의미한다.

학생들의 소집단 상호작용은 문제 상황 인식, 개념 세계, 모형 등의 모형구성 요소에 대한 논의로 세분화된다. 용어의 혼동을 막기 위해 담화를 비롯한 학생들의 전체적인 의사소통은 소집단 상호작용으로, 모형구성 요소에 대한 논의는 상호작용으로 구분하여 표현하였다.

1.5. 연구의 한계

본 연구에서는 학생들의 소집단 상호작용이 역학 문제에 대한 모형구성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고 이를 바탕으로 동료와의 상호작용이 물리학습에 더욱 의미 있게 기여하기 위한 시사점을 제공하고자 하였다. 이를 위해 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇이고 이를 해결하기 위한 소집단 상호작용은 어떠한 양상으로 진행되며, 소집단 상호작용이 학생들의 모형구성에 미치는 영향은 어떠한지를 분석하였다. 그러나 본 연구는 다음과 같은 한계를 가지고 있다.

첫째, 뉴턴 역학에 대한 정규 수업이 6개월 지난 시점에서 본 연구의 수업이 실행되었다는 점이다. 따라서 일부 학생들은 뉴턴 역학과 관련된 지식을 상기하는데 어려움을 보였다. 또한 학생들이 정규 수업을 통해 개념 세계를 어떤 방식으로 형성하였으며 이것이 연구 결과에 어떻게 영향을 미쳤는지 확인할 수 없었다.

둘째, 본 연구는 뉴턴 역학의 문제해결에 한정되었다는 점이다. 모형구성이 영역 의존적인 특성이 있음을 고려할 때 물리학의 다른 영역에서 소집단 상호작용은 뉴턴 역학과 상이한 방식으로 모형구성에 영향을 미칠 가능성이 있다. 물론 뉴턴 역학이 물리학의 기본적인 도구와 규칙을 제공한다는 점에서 본 연구의 결과가 물리학의 일반적인 특성을 반영했을 수도 있다. 이를 논의하기 위해서는 동일한 집단을 대상으로 물리학의 다른 영역에서의 모형구성과 소집단 상호작용에 대한 분석이 필요하다.

셋째, 학생들의 정의적 측면이 소집단 상호작용에 미친 영향에 대한 분석이다. 학생들의 인지적 측면과 더불어 성격, 의사소통 능력, 동료와의 관계, 물리 학습에 대한 자존감 등이 연구 결과에 미친 영향을 배제할 수 없다. 본 연구에서는 모형구성의 인지적 측면에 대한 분석에 초점

을 맞추었으므로 정의적 측면에 대해서는 깊게 다루지 않았다. 그러나 정의적 측면은 소집단 상호작용에 영향을 주는 핵심적인 요인이므로 추후 연구를 통해 심도 있게 분석할 필요가 있다.

마지막으로 본 연구의 대상들이 갖는 대표성이다. 연구의 대상들은 서울시에 소재한 일반계 고등학교 재학 중인 남학생 32명으로 모두 본 연구에 자발적으로 참여하였다. 따라서 물리에 대한 학생들의 흥미, 인식, 성취도, 학습 동기가 대체로 긍정적인 학생들이 많았다. 따라서 본 연구의 결과를 일반화하기 위해서는 다양한 지역, 성별, 학교들을 대상으로 한 추후 연구가 필요하다.

2. 선행 연구와 이론적 논의

2.1. 뉴턴 역학

오늘날 우리가 물리학이라고 부르는 거대한 체계는 다양한 영역으로 구성되어 있다. 그 중에서도 역학은 단순히 한 개 영역 이상의 의미를 지닌다. 역학은 '게임의 규칙'을 결정하고 물리학의 주요 도구를 정의함으로써 자연의 가장 보편적인 법칙을 제시한다. 이를 통해 역학은 물리학의 모든 다른 영역에서 적용되는 물리학의 방법을 기술한다. 이것이 바로 역학이 물리 교육과정에서 도입부에 위치하는 이유이다.¹⁾

역학 혹은 고전 역학이라 불리는 물리학의 영역은 대부분의 중등학교와 대학교의 입문 물리학 교재 앞부분에서 다뤄진다. 이는 역학이 갖는 역사적 의미와 더불어 Galili(1995)가 위에서 언급한 바와 같이 물리학의 보편적이고 기초적인 규칙을 제공하게 때문이다. 즉, 물리 이론은 적은 수의 가설을 기반으로 실제 세계의 현상을 근사적으로 나타낼 수 있는 일관된 수학적 구조를 제공하고 발달시키는데 목적(Corben & Stehle, 1960)이 있다는 점에서 역학은 물리학의 역사에서 최초로 정립된 이론인 동시에 전범(典範)인 셈이다.

역학은 .하이젠베르크의 불확정성 원리를 무시할 수 있는 조건 하에서 입자와 입자계의 운동에 관한 이론이다(Corben & Stehle, 1960). 역학은 수학적 구조와 이론의 발달 관점에서는 뉴턴 역학, 라그랑주 역학, 해밀턴 역학으로 분류되며, 대상의 상태나 속성, 운동의 관점에서는 입자 역학, 강체 역학, 천체 역학, 기체 분자 운동론, 탄성론, 유체 역학 등으로

1) Galili, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 17(3), 371-387. 371p에서 인용

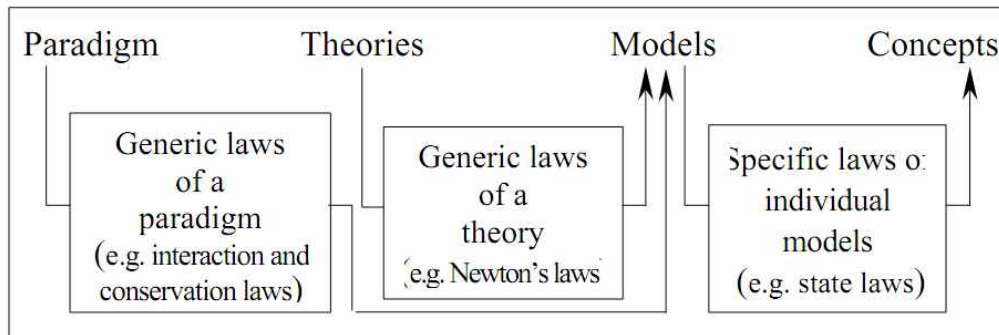
세분화된(Corben & Stehle, 1960).

역학을 대표하는 뉴턴 역학은 내용적으로는 입자 역학과 천체 역학에 걸쳐 있으며, 힘과 가속도 개념의 정립을 통해 현상의 기술에 머물러 있던 물리학을 인과적인 체계로 발전시켰다는 점에서 과학사의 획기적인 업적으로 평가받고 있다(French, 1971). 특히, 뉴턴 역학은 학생들이 물리학자들처럼 방대하고 위계화 된 지식 구조는 아니지만 소박하게나마 나름의 인지 구조를 가지고 있다는 점에서(Nersessian, 1995) 다른 역학의 이론들과 차별성을 갖는다. 따라서 학생들은 뉴턴 역학을 통해 물리학의 기본적인 원리와 공리를 접하고 소박하고 직관적인 패러다임을 물리적인 패러다임으로 전환될 수 있는 기회를 얻는다. 즉, 뉴턴 역학을 통해 학생들은 물리학의 보편적이고 기초적인 규칙을 접하게 되는 것이다. 이러한 관점은 대부분의 물리 교재들이 역학, 그 중에서도 뉴턴 역학을 도입부에 배치하는 당위성을 설명한다.

뉴턴 이전에 뉴턴 역학을 체계적으로 제시한 이는 없었지만 후대의 물리학자들에 의해 뉴턴 역학은 더욱 정교해지고 확장되었다(Hestenes, 1992). 따라서 뉴턴 역학은 대부분의 교과서에서 관행처럼 다루고 있는 뉴턴이 제시한 세 가지 운동 법칙만으로 충분히 이해될 수 없으며 고전 역학의 기본 축을 이루는 과학 이론으로써 체계적으로 살펴볼 필요가 있다.

2.1.1. 뉴턴 역학의 규칙

Halloun(2006)은 과학적 패러다임에서의 개념에 대한 조직도를 [그림 2-1]과 같이 제시하면서 모형을 통해서 이론이 과학적 패러다임의 개념적 내용을 제공한다고 설명하였다. Halloun(2006)은 모든 과학적 이론은 이론에 의해 제공되는 모형 혹은 모형군을 포함하고 있으며 모형을 거쳐야만 개념에 도달할 수 있다고 보았다. 고전 역학을 과학적 패러다임으로 바라보면 뉴턴 역학은 과학적 이론에 해당됨으로 뉴턴 역학을 이루는 모형들을 통해 개념들을 이해할 수 있을 것이다.



[그림 2-1] 과학적 패러다임의 조직(Halloun, 2006)

과학적 이론으로서 뉴턴 역학은 다음과 같은 요소들로 구성된다 (Halloun, 2006).

- (a) 모형 구성과 사용을 위한 특별한 규칙과 이론적 법칙
- (b) 모형 혹은 모형군

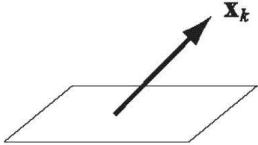

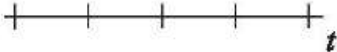
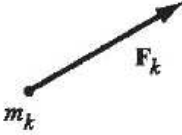
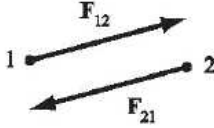
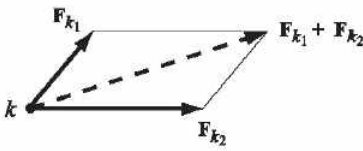
먼저 뉴턴 역학에서의 규칙에 대해서 알아보면, Hestenes(1992)는 뉴턴 역학의 기본 원리를 모형을 구성하는 규칙의 체계로 정의하고 뉴턴 역학의 기본 규칙을 체스에 비유하여 [표 2-1]과 같이 제시하였다.

[표 2-1] Newtonian 모델링 게임의 규칙(Hestenes, 1992)

공간(board)	물리적인 기준계의 3차원 유클리드 공간
말(piece)	점 입자 혹은 입자들로 구성된 모형 개체
목표(object)	물리 세계의 실체와 현상에 대한 타당한 모형을 생성
정당한 움직임 (legal movement)	(1) 입자들에게는 특정한 상호작용에 부합되는 기준계에서 초기 위치 또는 속도가 부여된다. (2) 입자들에게는 일반적인 상호작용 법칙에 부합되는 상호작용이 부여된다. (3) 입자들의 궤적은 일반적인 동역학 법칙이나 그로부터 파생되는 법칙들에 의해 계산되어야 한다. (4) 모형은 그것을 정의하는 법칙의 틀 안에서 물리적 현상과의 일치를 통해 검증된다.

Hestenes(1992)에 따르면 The Newtonian World는 뉴턴 역학에서 모델링 게임이 진행되는 개념의 경기장이다. 여기에는 여러 가지 난이도의 모델링 게임이 존재할 수 있지만 이들은 모두 물리적 현상의 검증된 모델을 생산한다는 공통의 목적을 가지고 있으며 뉴턴의 이론을 정의하는 법칙에서 파생된 동일한 규칙 체계를 공유한다(Hestenes, 1992). 뉴턴 이론을 정의하는 일반적인 법칙은 크게 운동학적(kinematical), 동역학적(dynamics), 상호작용(interaction) 법칙으로 나뉘지며 세부적인 내용은 [표 2-2]에 제시하였다.

[표 2-2] 뉴턴 역학을 정의하는 법칙(Hestenes, 1992)

법칙	설명	도식
운동학적 0^{th}	모든 입자 k 는 주어진 기준계에서 x_k 로 정의된 위치를 갖는다.	
	입자들의 운동은 궤적 $x_k(t)$ 로 표현된다.	
동역학적	1^{st} 관성계는 모든 자유 입자들이 등속 운동하는 기준계이다.	
	2^{nd} 관성기준계에서 힘은 다음과 같이 표현된다. $F_k = m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2}$	
상호작용	3^{rd} $F_{12} = -F_{21}$	
	4^{th} $F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$	
	5^{th} $F_{12} = F(x_1 - x_2, v_1 - v_2)$	

0th 법칙은 뉴턴 역학을 정의하는 법칙 중 가장 기초적인 것으로 길이와 방향, 시간의 측정에 대한 이론적 기반을 제공한다(Hestene, 1992). 1st, 2nd, 3rd 법칙은 뉴턴 역학에서 전통적으로 제시하고 있는 내용이며 4th은 중첩의 원리와 관련된 것이다(Hestene, 1992). 5th 법칙은 뉴턴 역학에서 암묵적으로 다루고 있는 힘의 특성과 관련된 정의를 공식화한 것으로, 두 입자 간의 힘의 함수는 입자들의 상대적인 위치와 속도에 의해 결정됨을 의미한다(Hestenes, 1992).

Hestenes(1992)가 뉴턴 역학의 규칙을 고전적인 법칙에 3가지 법칙을 추가하여 제시한 것과 달리 Halloun(2006)은 일반적인 규칙과 특정 규칙으로 나누어 설명하고자 하였다[표 2-3].

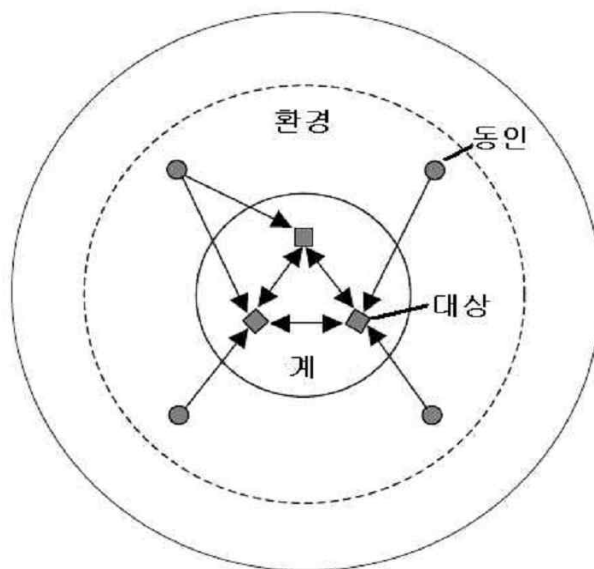
[표 2-3] 등가속도 운동에 대한 뉴턴 역학의 대응 규칙(Halloun, 2002)

규칙	예시
뉴턴 역학 이외의 다른 역학 이론에서도 일반적으로 통용되는 규칙	기준계는 관성기준계이다 계의 고유한 특성(예를 들면 질량이나 차원)은 설정된 정밀함의 한계 안에서 계의 속력에 의해 의미 있게 변하지 않는다. 계의 속력은 광속과 비교할 때 극단적으로 작게 유지된다.
뉴턴 역학 내의 다른 기본 모형에서도 일반적으로 통용되는 규칙	병진 운동하는 계는 특정 기준계에 위치한다. 계의 대상은 서로 상대적으로 운동하지만 대상의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다. 계에 속한 대상은 분해될 수 있지만 전체 계의 질량은 일정하게 유지된다. 병진 운동은 계의 모양이나 차원과 같은 기하학적인 특성에 영향을 받지 않는다.
등가속도 운동 모형에서만 통용되는 규칙	계의 병진 운동은 직선이나 포물선이다. 계에는 외부로부터 일정한 알짜힘이 작용하며 계의 가속도는 일정하다.

Halloun(2006)은 등가속도 운동을 예시로 뉴턴 역학의 대응 규칙

(correspondence rules)을 일반적인 규칙과 특정인 규칙으로 나누어 설명하며, 두 가지 규칙을 모두 준수하지 않는다면 모형은 더 이상 물리적인 계를 표상하지 않는 것이라고 설명하였다. 일반적인 규칙은 역학 분야 전체에서 통용되는 규칙과 뉴턴 역학 안에서만 통용되는 규칙으로 나뉘진다. 역학 분야의 대표적인 일반 규칙은 계의 고유한 특성이 변하지 않는다는 것으로 이를 준수하기 위해 대상들은 형태를 무시한 채 차원이 없는 가상의 질점으로 표현된다(Nersessian, 1995). 특정 규칙은 이론을 구성하는 특정 모형에서만 통용되는 규칙을 의미한다.

Halloun(2006)이 제시한 일반적인 규칙에 덧붙일 수 있는 것은 바로 계(system)의 설정이다. 계는 대상(object)으로 이루어지는데 한 개의 대상으로 이루어진 단순계(simple system)와 서로 상호작용하는 대상으로 이루어진 복합계(composite system)로 구별된다(Halloun, 2006). 계 외부에서 계를 이루는 대상들과 상호작용하는 물리적 실체들을 환경(environment)이라고 하며, 환경을 구성하는 각각의 물리적 실체를 동인(agent)이라 한다[그림 2-2].



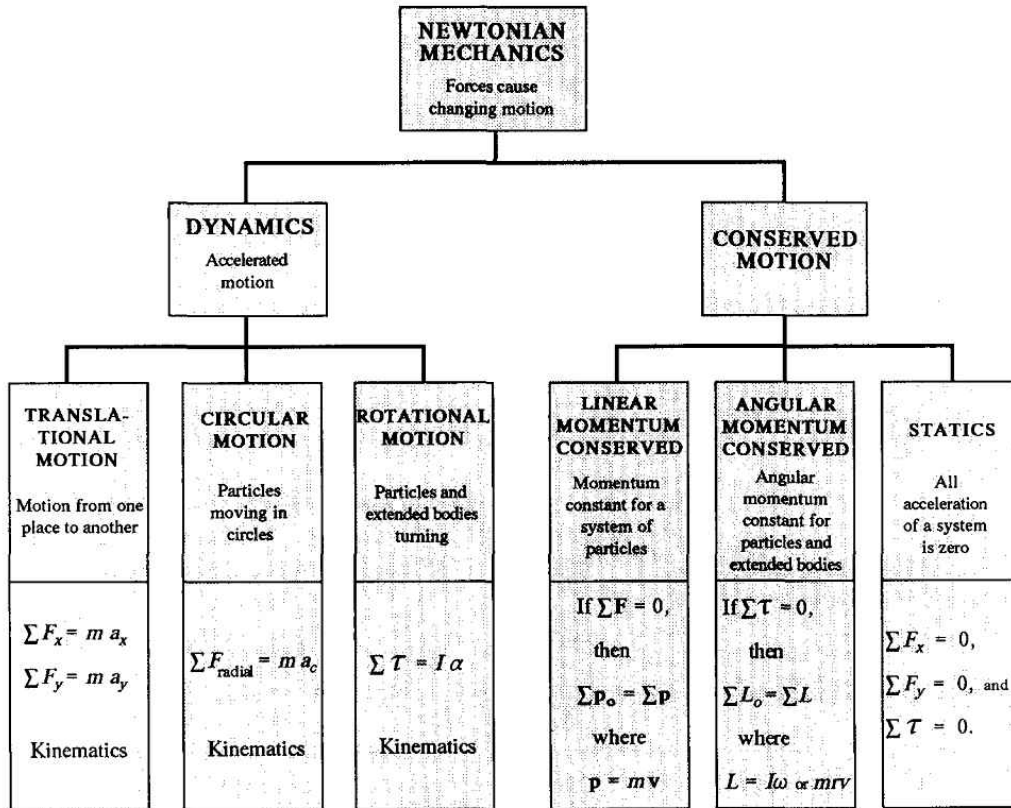
[그림 2-2] 대상과 동인, 계와 환경(Halloun, 2006)

대상과 동인을 구별하는 방법은 상호작용에 의한 상태 변화를 기술하는 차이로, 대상의 상태 변화는 기술하지만 동인의 상태 변화는 기술하지 않는다(Halloun, 2006). 예를 들면, 마찰력이 있는 경사면을 내려가는 수레의 경우 마찰력에 의한 운동 상태의 변화를 기술하지만 반작용에 의한 경사면과 지구의 운동 상태 변화는 기술하지 않는다. 이때의 경사면과 지구가 동인이며 이들을 묶어 환경이라고 할 수 있다.

Halloun(2006)은 계의 상태에 관한 일반적인 규칙을 제시하였으나 물리적인 실체들 중 무엇을 포함시켜 계를 설정하는가에 대해서는 언급하지 않았다. 뉴턴 역학의 다른 규칙이 준수되기 위해서는 적합한 계의 설정이 요구되며, 이와 관련된 핵심적인 규칙은 대상과 동인을 구별하는 것이라 할 수 있다.

2.1.2. 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조

Van Heuvelen(1991)은 [그림 2-3]과 같이 동역학과 보존되는 운동의 대범주로 뉴턴 역학의 지식 위계를 구성하였다. 세부 범주로는 동역학을 병진운동, 원운동, 회전 운동 등으로, 보존되는 운동을 운동량 보존, 각운동량 보존, 정역학 등으로 구분하였다(Van Heuvelen, 1991). Van Heuvelen(1991)의 이러한 시도는 문제해결의 측면에서 뉴턴 역학의 전반적인 내용을 포괄하는 위계를 설정했다는 점에서 의미를 부여할 수 있다. 그러나 대상의 물리적인 특성을 고려하지 않고 운동 상태만을 기준으로 적용했다는 점에서 분류 기준이 다소 피상적이며, 강체의 회전과 같이 일반 물리학에서 다루는 내용도 포함하고 있어 무차원의 입자를 다루는 중등 수준의 뉴턴 역학에는 적합하지 않다.



[그림 2-3] 뉴턴 역학의 위계(Van Heuvelen, 1991)

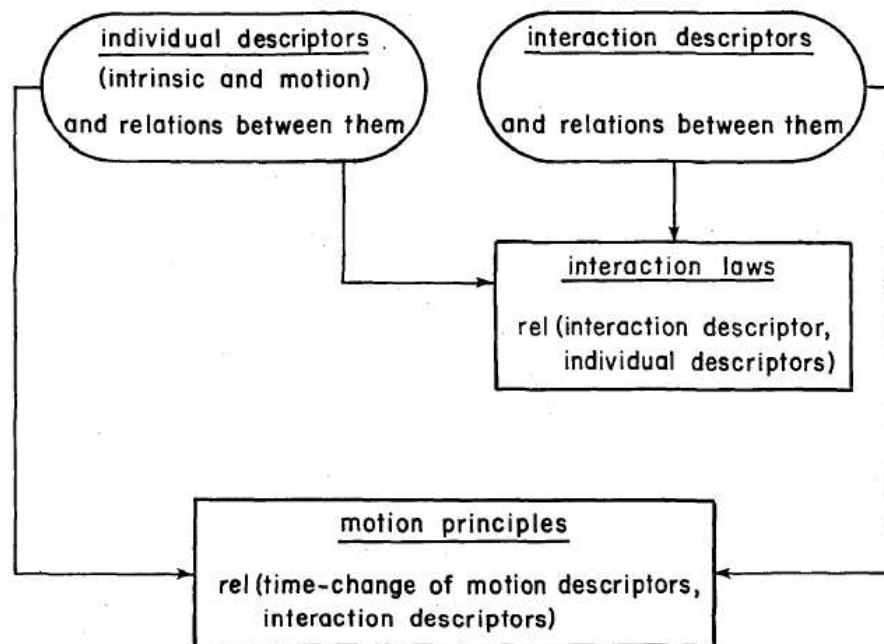
Halloun(2006)은 과학적 이론 안에 있는 여러 모형들은 모형의 범위와 개념의 복잡성에 따라서 신흥(emergent) 모형, 기본(basic) 모형, 부차(subsidiary) 모형으로 구분할 수 있다고 하였다. 신흥 모형은 기본 모형의 결합에 의해서 만들어지며, 부차 모형은 일상생활의 예가 해당된다. Halloun(2006)은 [표 2-4]와 같이 뉴턴 역학의 기본 모형을 자유 입자, 일정하게 가속되는 입자, 조화 진동자에 속박된 입자 및 일정한 원운동에 속박된 입자로 제시하였다.

[표 2-4] 뉴턴 역학의 기본 모형(Halloun, 2006)

기본 모형	설명
자유 입자	관성 기준계에서 합력이 0인 상태로 일정한 속도를 유지하는 물체
일정하게 가속되는 입자	일정한 합력 하에서 일정한 가속도로 직선이나 포물선 운동을 하는 물체
조화 진동자에 속박된 입자	힘의 중심으로부터 변위에 비례하는 합력 하에서 앞뒤로 주기운동을 하는 물체
일정한 원운동에 속박된 입자	일정한 크기의 구심력 하에서 일정한 원운동을 하는 물체
충격 상호작용의 입자	충돌의 경우처럼 아주 짧은 주기 동안 작용한 힘에 의해서 선운동량이 변한 물체

Hestenes(1992)와 Halloun(2006)이 패러다임의 관점에서 뉴턴 역학의 규칙과 위계를 제시하였다면 Reif & Heller(1982)는 영역(domain)의 특정한 실체(entities)들을 기술하는 특성 개념을 기술자(descriptor)라고 정의하고 기술자를 중심으로 뉴턴 역학의 문제해결을 위한 지식 기반(knowledge base)을 분석하였다. 특정 영역의 지식 기반(knowledge base)은 기술자들과 기술자간에 존재하는 관계, 그러한 관계를 변형하는 과정을 통해 구체화된다고(Reif & Heller, 1982). Reif & Heller(1982)에 따르면 역학의 지식 기반을 형성하는 기술자들은 [그림 2-3]과 같이 세분화된다. 기술자들은 개별적 기술자(individual descriptor)와 상호작용 기술자(interaction descriptor)로 나뉘지는데, 개별적 기술자는 입자들 간에 상호작용을 고려하지 않고 입자 하나의 특성을 의미하는 것으로 질량이나 속도를 그 예로 들 수 있다. 상호작용 기술자는 계 혹은 입자들이 어떻게 상호작용 하는지를 기술하기 위해 사용되며 힘과 돌림힘이 그 예이다. Reif & Heller(1982)는 기술자 개념을 이용하여 [그림 2-4]와 같이 역학 분야의 4가지 유형의 지식을 제안하였다.

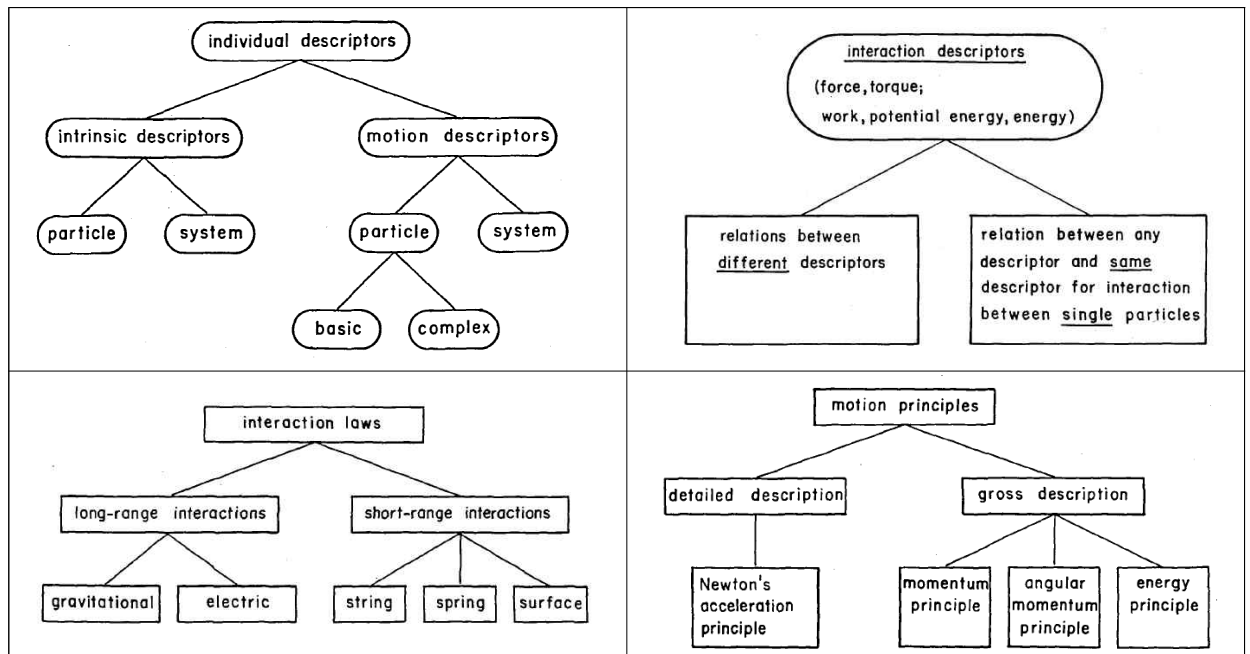
첫 번째 유형은 개별적 기술자 혹은 개별적 기술자들의 관계에 대한 것으로 질량과 같은 고유(intrinsic) 기술자와 위치, 속도와 같은 운동(motion) 기술자로 세분화된다. 두 번째 유형은 상호작용 기술자 혹은 상호작용 기술자의 관계에 대한 것이다. 세 번째 유형은 계와 입자들이 어떻게 상호작용하는가를 구체화하는 것으로 개별적 기술자와 상호작용 기술자의 관계를 기술한다. 네 번째 유형은 입장의 운동을 기술하기 위한 것으로 다른 계와의 상호작용에 의해 계의 상태 기술자가 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 구체화한다. 4가지 유형의 하위 범주를 [그림 2-5]에 표시하였다.



[그림 2-4] 역학 분야의 지식 유형(Reif & Heller, 1982)

Reif & Heller(1982)의 지식 유형은 기술자를 중심으로 역학 문제해결에 관한 지식 위계를 제안했다는 점에서 다른 선행 연구들과의 차이를 보인다. 또한 뉴턴 역학에서 자주 언급되는 중력과 탄성력, 표면에서 작용하는 힘들을 체계적으로 분류한 점 역시 뉴턴 역학을 학습하는 학생들의 입장에서 실질적으로 도움이 될 수 있는 부분이다. 그러나 뉴턴 역학

의 인과적인 구조를 운동 원리로 명명한 것은 표현과 의미 간의 괴리가 존재하기에 적절하지 않다고 판단된다. 또한 상호작용 기술자와 상호작용 법칙 간의 위계적인 요소를 고려한다면 4개보다는 3개의 지식 유형으로 나누는 것이 더 적절해 보인다.

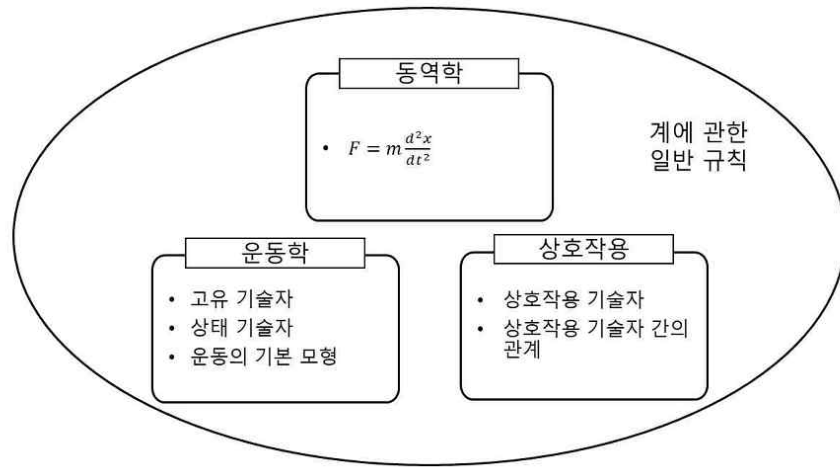


[그림 2-5] 역학의 지식 유형별 하위 범주(Reif & Heller, 1982)

본 연구에서는 앞에서의 논의를 종합하여 계에 관한 일반적인 규칙과 세 가지 범주의 지식으로 구성된 뉴턴 역학의 문제해결에 관한 지식 구조를 [그림 2-6]과 같이 정의하였다. 뉴턴 역학의 문제해결에 관한 지식 구조는 계에 관한 일반 규칙과 세부 지식으로 나뉘지며 세부 지식은 다시 동역학, 운동학, 상호작용으로 범주화된다.

먼저 뉴턴 역학에서 일반 규칙은 바로 계(system)와 관련된 것이다. 물리 이론을 적용하여 실체(reality)들의 상태와 운동을 설명하는 것은 실체들에 관한 계의 구성에서부터 시작된다(JI *et. al.*, 2017). 계에 관한 일반 규칙은 계의 구성과 특성, 운동의 기본 원리를 규정지음으로써 뉴턴 역학의 이론 체계 안에서 현상에 대한 설명이 타당성을 가지게 한다. 본 연구에서는 Halloun(2006)이 제시한 뉴턴 역학의 일반적인 규칙

(general rules)을 계에 초점을 맞추어 [표 2-5]와 같이 수정하였다.



[그림 2-6] 본 연구의 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조

운동학(Kinematics)은 운동 상태를 기술하는 것으로 질량과 같은 대상의 고유 기술자와 위치, 속도와 같은 상태 기술자, 운동의 기본 모형으로 세분화된다. 상태 기술자들의 관계는 운동의 기본 모형에 의해 구체화되며(Reif & Heller, 1982) 입자 운동에 관한 기본 모형은 등속직선 운동, 등가속도 운동, 원운동, 조화 진동자, 충격에 의한 운동으로 세분화된다(Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 상호작용(interaction)은 대상과 대상 혹은 대상과 동인 간의 상호작용을 의미하며 상호작용 기술자와 상호작용 기술자 간의 관계에 의해 구체화된다(Reif & Heller, 1982). 상호작용 기술자는 대상-대상 간의 상호작용과 대상-동인 간의 상호작용으로 구분된다(Halloun, 2006). 상호작용 기술자 간의 관계는 힘의 합성과 작용 반작용에 관한 것이다(Halloun, 2006). 마지막으로 동역학(Dynamics)은 상호작용에 의해 계의 운동 상태가 변화하는 인과 관계를 설명하는 것으로 운동 2법칙으로 표현된다.

[표 2-5] 본 연구의 계에 관한 일반 규칙

계의 구성	계는 하나 혹은 둘 이상의 대상으로 구성되며 대상은 차원이 없는 질점으로 간주된다.
계의 특성	계의 고유 특성은 계의 운동 상태에 의해 변하지 않는다.
계의 운동	<p>계의 운동을 기술하는 기준계는 관성기준계이다.</p> <p>계의 병진 운동은 계의 기하학적인 특성에 영향을 받지 않는다.</p> <p>계의 속력은 광속과 비교하여 극단적으로 작다.</p> <p>대상들의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다.</p> <p>대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다.</p>

2.1.3. 중등 교육과정의 뉴턴 역학

본 절에서는 뉴턴 역학과 관련된 중등 교육과정의 내용을 정리하였다. 먼저 중학교 과학과 고등학교 과학, 물리 I, II의 교육과정에서 뉴턴 역학과 관련된 내용을 [표 2-6]과 [표 2-7]에 정리하였다.

중학교와 고등학교에서 다루고 있는 뉴턴 역학에 대한 개괄적인 내용을 살펴보면 전반부에서 주로 상호작용과 관련된 내용을, 후반부에서는 그래프를 이용하여 등속직선 운동과 등가속도 운동을 다루고 있음을 알 수 있다. 그러나 가속도라는 개념을 명시적으로 다루지 않는 것으로 보아 뉴턴 역학의 인과적인 설명에 대해서는 깊게 다루지 않으려는 의도를 엿볼 수 있다. 고등학교 과학에서는 뉴턴 역학이 중단원 수준에서 다루지지 않고 행성의 운동과 관련해서 케플러 법칙과 뉴턴의 운동 법칙 간의 관계를 기술하는 정도에서 그치고 있다.

[표 2-6] 뉴턴 역학 관련 중학교와 고등학교 과학 성취기준(2011년 고시)(2011년 고시)

중학교 과학	고등학교 과학
<ul style="list-style-type: none"> ● 힘은 두 물체 사이의 상호작용임을 이해하고, 접촉에 의한 상호작용뿐 아니라 멀리 떨어져 있는 물체 사이의 상호작용이 있음을 안다. ● 중력, 탄성력, 마찰력, 전기력, 자기력 등 여러 가지 힘의 특징을 알고 이들이 주변의 현상을 이해하는 데 어떻게 활용되는지 이해한다. ● 한 물체에 작용하는 두 힘의 합력을 구할 수 있고 알짜 힘을 안다. ● 거리-시간, 속력-시간 그래프를 해석하여 물체의 운동을 설명할 수 있다. ● 물체의 운동을 관찰하여 힘의 작용에 대하여 알고, 이를 통하여 힘과 운동의 관계를 안다. 	<ul style="list-style-type: none"> ● 행성의 운동에 관한 케플러의 법칙을 알고, 뉴턴의 운동 법칙을 이용하여 케플러 법칙을 설명할 수 있다.

2009 개정 교육과정의 물리 I 은 기존 교육과정과 달리 시간, 거리, 위치 등의 유클리드 공간을 정의하는 물리량을 가장 먼저 다룬다. 그리고 속도, 가속도 개념을 도입하여 등속직선 운동과 등가속도 운동 모형에 대한 정량적인 이해를 추구하는 동시에 뉴턴의 운동 법칙을 통한 일차원 운동에 대한 인과적인 설명을 다룬다. 이를 이어 충격량과 운동량 개념으로 짧은 시간 동안 가속도가 변하는 운동을 기술하는 개념 모형을 제시하고 스포츠와 안전 분야에 이를 적용한다. 그러나 물리 I 에는 상호작용에 대해서 명시적으로 다루고 있는 내용이 운동 3법칙 이외에는 없으며 이는 중학교 과학과의 중복을 피하기 위한 것으로 해석된다.

[표 2-7] 뉴턴 역학 관련 물리 I, 물리 II 성취 기준(2011년 고시)

물리 I	물리 II
<ul style="list-style-type: none"> ● 시간을 측정하는 다양한 방법을 알고, 시간 표준의 의미와 확립과정을 이해한다. ● 거리와 위치 측정에 대한 다양한 방법을 알고, 길이 표준의 의미와 확립과정을 이해한다. ● 속도, 가속도의 개념을 이해하고, 이를 바탕으로 1차원 등가속도 운동을 이해한다. ● 뉴턴의 운동법칙을 1차원 운동에 적용하고, 스포츠 등에서 충격량과 운동량 변화의 관계를 이해한다. ● 행성의 운동에 대한 케플러 법칙이 뉴턴의 중력 법칙을 만족하는 것을 이해한다. 	<ul style="list-style-type: none"> ● 위치, 속도, 가속도를 벡터로 표현할 수 있다. ● 물체에 작용하는 힘이 주어졌을 때 운동변화를 정량적으로 이해한다. ● 지표면 근처에서 일어나는 포물선 운동과 원운동을 분석할 수 있다. ● 2차원에서 운동량 보존 개념을 이용하여 충돌 현상을 설명할 수 있다. ● 가속좌표계 안에서 관성력을 도입하여, 가속좌표계 안에서의 물체의 운동을 설명할 수 있다. ● 단진동의 의미와 진자의 주기에 영향을 주는 변인을 이해한다.

물리 II에서는 2차원 운동에 대한 정량적인 이해를 목표로 상태 기술자들을 벡터로써 표현한다. 그리고 뉴턴의 운동 법칙을 학생들이 이해하고 있다는 암묵적 전제 하에 포물선 운동과 원운동의 기본 모형을 정량적으로 표현한다. 물리 II에서는 물리 I 과 달리 운동량 보존을 명시적으로 도입하여 2차원 충돌에서 충돌 전후 물체의 운동을 정량적으로 제시한다. 가속좌표계의 의미와 관성력을 이용하여 가속좌표계를 관성좌표계로 전환하여 운동을 기술하는 방법을 다룬다. 마지막으로 단진자 운동의 정량적인 표현과 물리적인 의미, 주기에 영향을 주는 요인을 제시하였다.

힘과 운동이 중단원 이상의 수준에서 다뤄지고 있는 중학교 과학과 물리 I, II에서 뉴턴 역학의 입자 모형과 관련된 내용을 앞 절에서 제시한 물리 문제해결에 관한 뉴턴 역학의 지식 구조에 따라 [표 2-8]과 같이 분류하였다.

[표 2-8] 중등학교 교육과정에서 다루는 뉴턴 역학의 지식 구조

중학교 과학		물리 I		물리 II
일반적인 규칙		x	관성기준계, 가속기준계 (상대성이론에서 다름)	가속기준계
운동학	상태 기술자	속도	변위, 속도, 가속도, 운동량	변위, 속도, 가속도, 운동량 (벡터)
	상태기술자 간의 관계	등속직선 운동 등가속도 운동 (정성적)	등속직선 운동 등가속도 운동 충격에 의한 운동 원운동	포물선 운동 원운동 조화 진동자 2차원 충돌
	상호작용 기술자	중력, 탄성력, 마찰력	중력, 충격력, 구심력	중력, 구심력, 관성력, 탄성력, 장력
상호작용	상호작용 기술자 간의 관계	힘의 합성	작용 반작용	x
동역학		x	$F=ma$ $F\Delta t = \Delta p$	$F=ma$

계에 관한 일반 규칙은 물리 I에서 처음으로 언급된다. 그러나 기준계에 대한 내용이 역학에서 다루이지 않고 다음 대단원의 상대성 이론에 등장함으로써 실질적으로 뉴턴 역학의 이해에는 도움이 되지 못하고 있다. 물리 II에서는 관성력을 도입하여 가속기준계를 관성기준계로 전환하여 물체의 운동을 설명할 수 있음을 제시하지만 기준계의 정의와 특성에 대해서는 구체적으로 설명하지 않고 있다.

뉴턴 역학의 일반적인 규칙을 언제 가르쳐야 하는가에 대해서는 논란이 있을 수 있으나(Hestenes, 1992) 물리 II에서조차 제대로 언급되지 않는 점은 고전 역학 패러다임의 이해와 전환이라는 측면에서 비판의 소지가 있다. 또한 물리 I의 경우 뉴턴 역학의 일반적인 규칙에 대한 이해가 부재한 상태에서 상대성 이론의 일반적인 규칙과 인식론을 다루는 것이 적절한지에 관한 비판의 목소리가 있다(Hestenes, 1987; Jho, 2014).

운동학은 급간이 올라감에 따라 등속직선 운동, 등가속도 운동, 원운동, 충격에 의한 운동, 조화 진동자 순으로 시간에 따른 상태 기술자와 차원이 복잡해지는 상황을 다루고 있다. 또한 중학교에서는 언어적인 표상을 위주로 하며 제한된 경우에만 그래프로 개념 모형을 제시했지만 물리 I, 물리 II에서는 그래프와 수식을 중심으로 개념 모형을 표상하고 있다.

중학교에서는 상호작용에 많은 내용을 할애하고 있는데 이는 중학교에서 운동의 인과적인 설명을 시도하지 않는다는 점에서 다소 의아하다. 특히 힘의 합성을 통해 알짜힘을 구하는 것은 뉴턴의 운동 2법칙을 통해 그 물리적인 의미가 실체화 된다는 점에서 중학교보다는 물리 I에서 다루는 것이 적절하다고 판단된다. 또한 물리 I에서는 상호작용 기술자에 대한 언급이 거의 없으나 교과서나 대학수학능력시험에서 다양한 상호작용 기술자를 다루고 있어 현실과 교육과정 사이에 괴리가 크다. 이로 인해 학생들이 물리 I의 문제를 해결할 때 상호작용에 대한 기초 지식이 없어 어려움을 겪고 있는 것으로 나타났다(Lim & Lee, 2015).

동역학에 대한 언급은 중학교에서 명시적으로 나타나지 않았으며 물리 I에서는 뉴턴의 운동 2법칙과 충격량-운동량 관계로 다루진다. 다만 뉴턴의 운동 2법칙과 충격량-운동량 관계가 물리적으로 동일한 인과 구조임에도 불구하고 마치 별개의 법칙처럼 다루고 있어 학생들이 이 둘을 별개의 의미로 해석할 소지가 있다.

2.2. 물리 문제해결

일반적으로 문제해결은 ‘문제’의 내용과 성격에 따라서 영역 특이적 문제해결(Domain-specific Problem Solving)과 일반적 문제해결(General Problem Solving)로 분류된다(박학규, 권재술, 1991). 특정분야 문제해결은 수학이나 물리학, 언어학 등의 분야와 관련된 문제해결로써 교과 교육의 핵심적인 활동이자 중요한 연구 분야이다(박학규, 권재술, 1991). 물리교육에서 물리 문제해결은 문제해결에 관한 학생들의 인지적 과정을 이해하고 물리 문제해결에 대한 학생들의 어려움을 해소시킴으로써 물리에 대한 긍정적인 인식을 심어주기 위해 물리 교육 분야에서 꾸준히 다뤄진 주제이다(Van Heuvelen, 1991; 박학규, 권재술, 1991; Hsu, *et al.*, 2004, Byun & Lee, 2013; Lim & Lee, 2015; Mason & Singh; 2016; Balta, 2016). 이 절에서는 물리 문제해결이 물리 학습에서 갖는 의의와 학생들의 어려움에 관한 논의를 하고자 한다.

2.2.1. 물리 문제해결의 의의

중등학교와 대학교에서 물리를 가르치는 교수자들은 물리 학습에서 문제해결 활동은 다방면의 이득이 있다고 믿고 있다. 가장 광범위하게 알려진 물리 문제해결의 효용성은 바로 물리 개념의 이해이다(Stanic & Kilpatrick, 1988; Van Heuvelen, 1991; Hsu, *et al.*, 2004). 문제는 학습 주제에 대한 이해를 높일 수 있는 도구로써 문제를 푸는 것은 새로운 개념이나 절차를 습득하는 수단(vehicle)으로 간주된다(Stanic & Kilpatrick, 1988). 학생들은 물리 문제를 푸는 과정 중에 개념이 형성되고 개념을 적용하는 방법을 터득할 수 있다(Van Heuvelen, 1991; Hsu, *et al.*, 2004; McDaniel, 2016). Osborne(1990)은 특히, 개념과 같은 물리적인 요소에 관한 물리 문제해결에서는 위 가정의 믿음이 다른 분야에

비해 더욱 뿌리 깊음을 지적하였다.

물리 문제해결은 물리 개념의 이해를 지원하는 동시에 평가를 수행하는 도구이기도 하다(Maloney, 1994). 문제를 해결하는 것은 교육과정에서 제시하고 있는 학습 목표는 아니지만 특정 유형의 문제를 성공적으로 해결하는 것은 특정 개념을 이해했다는 근거로 이해된다(Hestenes *et al.*, 1992; Hestenes & Wells, 1992). 이러한 관점에서 FCI(Force Concept Inventory; Hestenes *et al.*, 1992), MBT(Mechanic Baseline Test; Hestenes & Wells, 1992), TUGK(Test of Understanding Graphs-Kinematics; Beichner, 1994) 등의 다양한 개념 검사 도구가 선다형 문항 형태로 제작되었다. 대부분의 학교 현장에서는 물리 문제해결과 개념 이해의 관계에 대한 암묵적 동의하에 물리 문제를 통해 학생들의 성취도를 평가하고 있다. 그러나 일부 연구에서 물리 문제해결과 물리 개념의 이해 간에 직접적인 연관성이 약하다고 보고하고 있어(Sawrey, 1990; Kim & Pak, 2002; 변태진, 2012; McDaniel, 2016) 물리 문제해결 결과가 반드시 개념의 이해를 담보하지 않는다는 것을 알 수 있다.

물리 문제해결은 개념과 같은 명제적 지식뿐만이 아니라 물리학의 절차적 지식과 밀접하게 연관되었다는 입장도 존재한다(Hestenes 1987; Halloun & Hestenes, 1987; Brewe, 2008). Hestenes(1987)는 물리 지식을 사실적 지식(factual knowledge)과 절차적 지식(procedural knowledge)으로 양분하고 절차적 지식이 모형 구성과 밀접하게 연관되어 있다고 주장한다. 특히 Brewe(2008)는 엄선된 문제들을 통해 과학적 지식의 절차적인 측면을 효과적으로 배울 수 있다고 주장하였다. 그러나 대부분의 연구들은 문제해결을 지원하기 위한 과정적 지식의 정의와 체계화에 집중하여 전문가와 초심자를 비교하는 방식으로 진행되었고(Larkin & Reif, 1979; 권재술, 이성왕, 1994; Henderson *et al.*, 2004; Hsu, *et al.*, 2004), 문제해결을 통해 과학의 어떤 과정적 지식을 익힐 수 있는가에 대한 실증적인 논의가 많지 않다.

마지막으로 물리 문제를 해결함으로써 일반적인 영역에서의 문제해결에 도움이 된다는 입장이다. 물리 문제해결 연구의 궁극적인 목적이 보다 효과적이고 일반적인 문제해결 방법을 찾아 이를 학생들에게 가르침으로써 학생들의 문제해결 능력을 향상시킬 수 있다는 관점이다(박윤배, 권재술, 1991). 그럼에도 물리 문제해결의 경험이 명시적으로 일반적인 영역의 문제해결 능력 향상에 도움이 되었다는 실증적인 연구 결과를 찾아보기 어렵다. 제한적으로 과학적 지식을 일상생활에 적용한 연구 결과를 보면, Clement(1982)는 학생들이 제한된 상황에서만 자신이 배운 과학적 개념을 이용할 수 있으며, 공식 위주의 지식(formula-centered knowledge)을 갖춘 학생의 경우 일상적 상황에서 문제 해결능력이 떨어진다고 보고하였다. 노금자, 김효남(1996)은 초등학생들은 과학적 상황에서는 학교에서 배운 지식을 활용하지만, 일상적 상황에서는 감각적 경험에 의존한다고 주장하였다. 따라서 물리적 지식과 물리 문제해결 능력이 일상생활을 비롯한 다양한 영역에서의 문제해결을 하는데 도움이 되는가에 관해서는 아직까지 실증적인 연구 결과가 부족하다고 할 수 있다. 다만 물리 전공자가 직업 영역에서 동료들로부터 문제해결능력이 뛰어나다는 평가를 받고 있으며, 이를 물리 학습과 물리학의 다양한 문제를 해결하는 과정에서 습득된 능력으로 해석하는 연구 결과도 존재한다(Jin & Yoo, 2014). 종합해보면, 물리 문제해결 경험이 일반적인 영역에서의 문제해결능력 향상에 기여한다는 실증적인 근거는 부족하나 장기간에 걸쳐 물리학을 학습한 사람들은 문제해결 능력 측면에서 우수한 평가를 받고 있음을 잠정적으로 확인할 수 있다.

2.2.2. 물리 문제해결 과정에서 학생들이 겪는 어려움

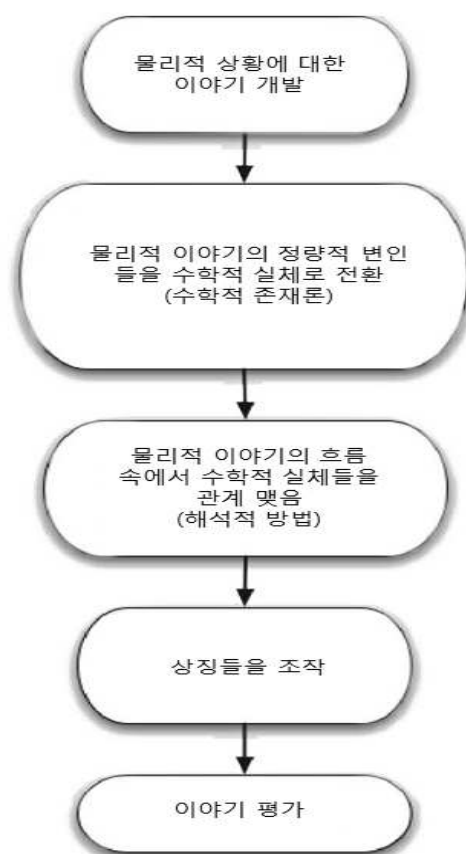
물리 문제해결에 관한 교수-학습에서의 어려움은 크게 인식론적인 측면과 수학적 지식, 표상, 명제적 지식과 같은 내용적인 측면으로 나눌 수 있다. 학습에 있어 인식론적 이해는 인지적 과정에 중대한 영향을 미치

는 요인이며(Hofer, 2001) 약한 인식론적 이해는 학생들의 수행, 일반적 탐구, 물리 개념 학습을 제한한다(Hammer, 1994). 다수의 선행 연구에서 고등학생과 대학생들이 물리 문제해결 과정을 연관된 개념과 이론들로 물리적 상황을 해석하고 설명하는 활동보다는 수학적 계산과정으로 받아들이고 있음을 지적하였다(Larkin & Reif, 1979; Redish *et al.*, 1998; Halloun, 2006; Sherin, 2006; Mason & Singh, 2010; de Ataíde & Greca, 2013). Halloun(2006)은 이를 문제 상황과 관련된 이론과 개념이 어떻게 실제 세계의 대상을 표상하고 있는지 명시적으로 다루지 않았기 때문이라고 주장한다. 예를 들면 학생들은 뉴턴 역학에 관한 문제들은 이론적인 세상에서 존재하며 실제 세상에 대한 구현 가능성(viability)이 없는 것으로 인식함으로써 물리적인 해석이나 설명에 무지하게 된다는 것이다(Halloun, 2006). 교사들과 물리학자들 역시 수학을 특정 문제를 해결하기 위한 도구로 여기고 있으며, 이러한 인식이 학생들에게 전달되어 수학적 표현에 대한 지식과 방정식을 푸는 방법을 익히는 것이 물리학을 잘한다는 인상을 심어주고 있다(de Ataíde & Greca, 2013).

이러한 물리학에 대한 편향된 인식은 물리교과와 수학교과의 연계성 때문으로 해석하는 시각이 많다. 수학은 단순한 도구가 아닌 물리학의 언어이며(Redish, 2006), 계산틀을 제공하고, 물리적인 생각을 반영하고, 규칙을 부호화하는 역할을 한다(Bing & Redish, 2009). 학습자는 수학적 구조가 어떻게 이용되는지, 수학적 구조가 물리적 특성과 어떻게 연관되는지, 실제 물리적 상황을 표상하기 위한 수학적 구조의 정당성을 어떻게 검증하는지 알아야 한다(Karam, 2014).

그럼에도 많은 학생들이 수학과 물리의 관계에 대한 적절한 인식을 바탕으로 물리 문제해결을 수행하지 못하고 있다(Redish, 2006; Tuminaro & Redish, 2007; Jung & Lee, 2009; Niss, 2017). 대표적으로 Tuminaro & Redish(2007)는 대학생들이 물리 문제를 풀기 위해 수학을 사용할 때 6가지의 인식론적 게임을 하고 있는 것으로 확인하였다. 6가지의 인식론적 게임은 물리적인 의미를 수학으로 사상, 수학을 물리적인 의미로 사

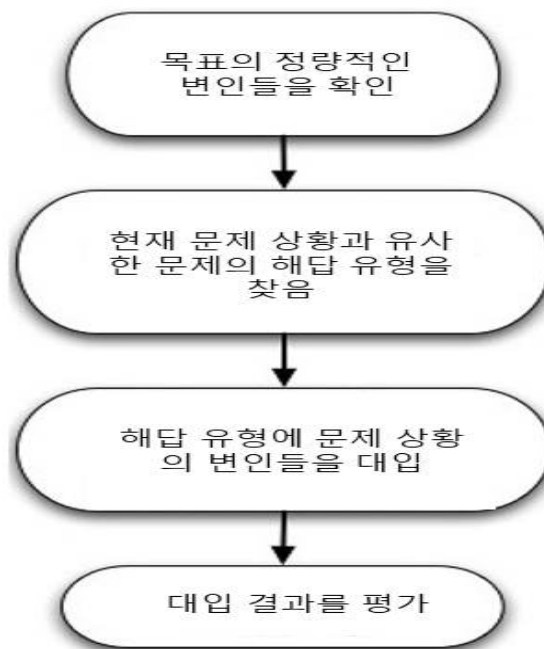
상, 물리적인 메커니즘 게임, 그림 분석, 반복적인 기계적 접근, 수학으로의 음역(transliteration)이다. 이 중 가장 복잡한 인식론적 게임은 물리적인 의미를 수학으로 사상(mapping)하는 것으로 학생들이 먼저 물리적인 상황에 대한 이야기(story)를 개발한 다음 물리학 이야기의 정량적인 값들을 수학적 실체로 변환하게 된다. 그리고 이야기의 흐름에 따라 수학적 실체들을 관계 맺고 조작한 결과를 스토리에 비추어 평가하게 된다 (Tuminaro & Redish, 2007).[그림 2-7]



[그림 2-7] 물리적 의미를 수학으로 사
상에 대한 도식(Tuminaro & Redish,
2007)

반면에 수학으로의 음역(Transliteration To Mathematics)은 물리적인

인식이나 이해가 뒷받침되지 않는다는 측면에서 물리적 의미를 수학으로 사상하는 것과 가장 대조적인 인식론적 게임이다(Tuminaro & Redish, 2007). 즉, 문제에 대한 개념적 이해 없이 다른 문제의 해답 패턴에 변인 값을 대입하는 것으로 방정식의 구문 구조와 관련된 도식만이 활성화 된다(Tuminaro & Redish, 2007; Bing & Redish, 2009)[그림 2-8]. 이러한 인식론적 게임은 오로지 정답만을 구하기 위한 것으로 본질적으로 물리 문제를 해결하는 것에 대한 성찰의 부재에서 기인하며 물리 문제를 푸는 것이 물리를 공부하는 것이라는 과도한 맹신에서 비롯된 것이다. 이러한 인식론적 편견은 물리 문제해결을 수학적 계산과정으로 한정지음으로써 물리 문제해결을 의미하는 물리학습으로 이어지게 하는데 가장 큰 걸림돌이 된다(Pepper *et al.*, 2012; Niss, 2017).



[그림 2-8] 수학으로의 음역에 대한 도식
(Tuminaro & Redish, 2007)

수학과 물리학의 관계에 대한 인식에서 겪는 어려움과 별도로 수학은 그 자체로 물리 문제해결의 주된 어려움이다(Byun & Lee, 2010; Jeong

et al., 2010; Nguyen & Rebello, 2011; Pepper *et al.*, 2012; Lim & Lee, 2015; Niss, 2017). Byun & Lee(2010)는 인터뷰, Weekly Report, 문제풀이 보고서 등을 분석한 결과 전공 역학 학습에서 대학생들이 느끼는 어려움 중의 하나는 수학 기술의 부족이라 보고하였다. 대학생들은 미분방정식, Taylor 급수, Fourier 급수 등에 의한 근사를 이해하는 데 어려움을 겪고 있는 것으로 나타났다(Byun & Lee, 2010). 이와 비슷한 맥락에서 Jeon *et al.*(2010)는 전공 역학 수업에서 학생들이 일차원 운동과 관련된 미분 방정식의 표현과 풀이에 대한 기초적이고 세부적인 내용, 수식을 물리적으로 해석하는데 어려움을 겪고 있음을 확인하였다. Nguyen & Rebello(2011)는 미적분학을 기반으로 한 일반 물리학 수업에서 대부분의 대학생들이 전자기학의 문제를 해결하는데 있어서 적분의 필요성을 인지하고 있지만 원하는 적분을 설정하는데 어려움을 겪고 있다고 보고하였다. 그는 이러한 어려움이 무한소와 무한히 더하는 것에 관한 개념을 완전히 이해하지 못하는데서 비롯된 것이라고 주장하였다. 또한 Pepper *et al.*(2012)는 대학생들이 벡터의 방향과 크기를 물리량과 연결하는데 어려움을 겪으며 도함수와 함수 값을 혼동하고 있는 것으로 보고하였다. 뿐만 아니라 대학생들이 발산(divergence) 개념을 적절히 이해하여 공간적 상황이나 전기장에 일관성 있게 적용하지 못하고 발산의 사전적인 정의에 의존하는 것으로 나타났다(Pepper *et al.*, 2012).

앞에서 언급한 연구 결과들이 대학생에 관한 것이었다면 Lim & Lee(2015)는 고등학생들이 역학 문제를 풀 때 겪는 어려움을 명제적 지식과 과정적 지식으로 나누어서 분석하여, 풀이(solution) 과정에서 관계식 활용 능력 부족과 관련된 어려움의 사례를 보고하였다. 구체적으로 고등학생들이 수학적 공식을 알고 있었음에도 공식에 대입할 변인값을 정확하게 찾지 못하거나 평균값을 구하기 위한 수학적 스킬이 부족한 경우를 사례로 제시하였다(Lim & Lee, 2015).

Niss(2017)는 물리 문제 상황은 수학적 세계로의 전환이 가능한 방식으로 구성되었다고 주장하며, 이를 수식화를 위한 구조(structure for

mathematization)라고 불렀다. 그는 대학생들이 짝을 이루어 유체 역학의 문제를 해결하는 과정을 분석한 결과 물리적인 실체에 관한 수학적 객체(object) 인식 부족, 수학적 체계화(systematization)의 미흡, 지나치게 복잡하게 설정된 수학적 객체 등을 수학과 관련해서 학생들이 겪는 어려움으로 보고하였다. Niss(2017)가 말하는 수학적 객체는 Halloun(2006)이 제시한 서술자(decitor)와 상당히 유사한데 서술자는 물리적인 실체(대상과 동인)를 표상함으로써 형태론적 양상을 서술하는 기하학적 개념이다(Halloun, 2006). 앞에서 언급한 연구들이 일반적인 관점에서 물리 문제해결에서 수학 개념에 대한 이해와 활용의 어려움을 기술한 것과 달리 Niss(2017)의 연구는 물리적인 대상을 수학적으로 표상하는 과정에서 학생들이 겪는 어려움을 명시적이고 구체적으로 제시했다는 점에서 의의가 있다.

수학과 관련된 물리 문제해결의 어려움을 종합해보면, 수학적 이해 혹은 기술의 부족에 관한 측면과 수식의 물리적인 의미를 이해하는 측면으로 나눌 수 있다. 이 두 측면을 독립된 영역으로 분리하여 분석한 연구도 있으나 물리학과 수학에 관계를 핵심 주제로 삼은 연구들에서 두 측면은 상호연관성이 있는 것으로 나타났다(Nguyen & Rebello, 2011; Pepper *et al.*, 2012; Niss, 2017). 또한 고등학생들을 대상으로 한 연구에서는 수학적 지식 그 자체보다는 수학적 지식의 활용이 어려움의 원인으로 나타난 반면(Lim & Lee, 2015), 일반 물리학이나 전공 물리학을 수강하는 대학생들을 대상으로 한 연구에서는 주로 수학적 지식의 이해 부족 자체가 어려움의 핵심적인 영역을 차지하고 있다고 정리할 수 있다(Byun & Lee, 2010; Jeong *et al.*, 2010; Lim & Lee, Nguyen & Rebello, 2011; Pepper *et al.*, 2012; Niss, 2017).

표상(representation)은 문제해결의 구성 요소 중의 하나로 문제해결자가 하나의 문제 상황을 내적 표상으로 변환하여 문제의 초기 상태에서부터 목표 상태까지의 범위를 지닌 문제공간을 통과하는 하나의 통로를 탐색할 때 문제를 해결할 수 있다고 하였다(Simon & Newell, 1978). Van

Heuvelen(1991)은 물리학자들은 물리적 과정을 이해하고 수학적 표현을 구성하는데 있어 정성적인 분석과 표상에 의지한다고 주장하였다. Van Heuvelen(1991)에 따르면 대학생들은 물리 문제를 해결할 때 다이어그램을 잘 사용하지 않으며 학생들이 다이어그램을 잘 사용하지 않는 이유로 학생들은 다이어그램이 나타내는 기본적인 변인들과 개념의 의미를 이해하지 못하고, 표상을 구성하는 기술이 발달할 기회를 제공받지 못했기 때문이라고 해석하였다. Kohl & Finkelstein(2008)은 일반물리학 수강생(초심자)과 대학원생(전문가)을 대상으로 물리 문제 해결과정에서 나타나는 다양한 표상의 양상을 연구하였다. Kohl & Finkelstein(2008)은 전문가와 초보자의 표상 사용에 있어 다양한 표상을 활용한다는 점에서 유사성을 보이지만 표상 사용의 유연성과 신속성에 있어 전문가가 더욱 능숙하다는 것을 확인하였다. Lim & Lee(2015)는 역학 문제해결의 문제이해 단계에서 시각적 인식 능력에 관한 고등학생들의 어려움이 확인되며 세부적으로는 그래프 해석 능력과 그림 해석 능력이 여기에 해당된다고 보고하였다. 또한 계획 단계에서의 문제 재구성과 관련해서 시각적 변환 능력, 즉 표상의 전환이 핵심적인 어려움으로 식별되었다(Lim & Lee, 2015).

마지막으로 논의할 학생들의 어려움은 물리 문제해결의 필수적인 요소인 명제적 지식(propositional knowledge)에 관한 것이다. 명제적 지식은 선언적 지식(declarative knowledge) 혹은 개념적 지식(conceptual knowledge)라고도 불리며 문제와 관련된 원리, 공식, 개념들에 대한 사실적 정보 또는 내용을 의미한다(Alexander & Judy, 1988; 박윤배, 1991). 과학에서의 문제해결은 해당 영역의 특정 지식으로 이루어진 지적 기반 없이는 불가능하므로(Reif & Heller, 1982) 물리 문제해결과 관련된 명제적 지식은 문제해결의 필수적인 요소이다. 명제적 지식과 관련된 많은 연구들이 초심자와 전문가가 가진 지식의 양과 질을 비교하는 형태로 진행되었다. 권재술, 이성왕(1988)은 [표 2-9]와 같이 물리 문제 해결에서 초심자와 전문가의 차이를 정리하였다.

[표 2-9] 초심자와 전문가의 지식 비교(권재술, 이성왕, 1988), 변태진(2012)에서 재인용

구분	초심자	전문가
일반적인 경우	해당분야의 지식이 적음 초보적인 조직 체계 문제해결 경험이 적음 논리적 사고력의 수준이 낮음	많은 지식을 가지고 있으며, 개념들이 무리지어 하나의 단위(chunk)로 기억 개념간의 위계가 잘 조직 논리적 사고력 사고력이 높음
물리 문제해결의 경우	물리학 전반에 걸친 지식이 적음 초보적인 위계조직 수학적 기능이 낮음	물리학 전반의 지식이 풍부함 수학적 기능 우수 잘 분화된 논리적 사고력

지금까지 논의한 결과를 종합해보면, 물리 문제해결에서 겪는 학생들이 겪는 어려움을 지식적인 측면에서 문제의 상황에 적절하게 이들을 적용하고 조직하는 과정과 그 결과에 관한 물리적인 해석과 관련된 측면으로 최근 연구의 흐름이 변해가고 있는 것으로 파악된다. 이러한 흐름은 내용 지식의 축적이나 반복적인 문제해결의 경험만으로는 물리 문제해결을 의미 있는 물리학습으로 유도하기 어렵다는 인식(변태진, 2012)에서 비롯된다고 판단된다. 또한 물리 문제해결에 관한 연구에서는 공통적으로 학생들이 물리적인 개념에 대한 이해와 활용에 있어서의 어려움을 지적하고 있으나 물리적인 개념의 이해와 활용이 구체적으로 무엇을 의미하며 어떤 관점에서 물리 문제해결과 연관되어야 하는지를 제시하는 연구들은 많지 않다. 이에 다음 절에서는 최근 과학교육계에서 대두되고 있는 모형구성 이론을 소개하고 앞에서 언급한 내용들과 관련하여 물리 문제해결에 어떤 이론적 시사점을 제공하는지 논의하고자 한다.

2.3. 모형구성

본 절에서는 과학교수학습에서 모형구성에 대한 전반적인 검토를 통해 물리 문제해결을 모형구성의 관점에서 어떻게 해석할 수 있는지를 논의하였다. 이 절의 마지막에서는 본 연구에서 사용할 모형구성의 분석틀이 어떻게 정리되었는지 상세히 설명하였다.

2.3.1. 모형(Model)과 모형구성

1) 모형

모형에 대한 정의는 학자들마다 분분하며 여러 학계에서 다양한 의미로 사용되고 있다(Halloun, 2006). 과학교육 분야에서는 모형의 광범위한 정의를 크게 두 가지 입장에서 정리하는 시각이 존재한다(이동욱, 2015). 첫째는 모형을 자연 현상의 특정 유형에 초점을 맞춰 물리적인 계를 추상화하고 단순화한 시스템 또는 표상이라고 보는 입장이다(Hestenes, 1987; Harrison & Treagust, 2000; Justi & Gilbert, 2005; Schwarz *et al.*, 2009). 이들의 관점에서 학습자의 모형이란 그림 혹은 도식의 표상으로 해석된다. 표상의 종류에 따라 모형은 세분화될 수 있는데 Gilbert(2005)는 모형을 구체적(concrete) 모형, 시각적(visual) 모형, 수학적(mathematical) 모형으로 구분하였다.

한편, 모형을 현상과 이론을 연계하는 설명 체계로 인식하는 입장도 있다(Clement, 2008; Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007). Halloun(2006)은 모형을 이론을 기반으로 하여 물리적 계의 구조나 행동에서 나타나는 특정한 유형을 기술하거나 예측하는 개념적 체계를 과학적 모형으로 정의하였다. 모형이 가설적 또는 이론적 설명 체계로써 이론을 기반으로 구성되지만 개념세계와 실제세계를 중재하는 역할을 하며 이론으로 전환되기도 한다(Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007). 이들의

관점에서 학습자의 모형이란 자연 현상이나 문제 상황에 대한 설명 체계로 해석된다.

모형에 관한 두 입장은 모형과 이론 간의 관계, 모형의 표상, 모형의 범위에 대해 각기 다른 해석을 내리고 있다. 그러나 모형이 자연의 모든 실체들을 표상하지 않고 특정한 대상이나 유형의 특징을 대리한다는 측면을 공통적으로 포함하고 있다. 본 연구의 참여자들은 이론적으로 추상화되고 개념화된 문제 상황에 대한 모형을 구성하므로 이론에 기반하여 설명 체계를 구성하게 된다. 따라서 본 연구에서는 모형을 문제 상황을 이해하고 기술하기 위한 설명 체계로 이해하였다.

2) 모형구성

일반적으로 모형구성은 특정한 대상이나 현상에 대한 설명 체계를 생성하기 위해 새로운 모형을 구성하거나 기존의 모형을 사용하는 과정이다(Hestenes, 1997; Lopes & Costa, 2007; Clement, 2008). 과학자들의 관점에서 모형구성은 자연 현상의 특정한 유형을 설명하고 예측하기 위한 이론을 생성해가는 과정이다(Halloun, 2006). 반면에 학습의 관점에서 모형구성이란 문제 상황이나 자연 현상에 대해 구성한 정신 모형(mental model)을 과학적이고 개념 모형(conceptual model)으로 변화시킴으로써 개념 세계를 확장해가는 과정이다(Greca & Moreira, 2002; Lopes & Costa, 2007).

정신 모형(Mental Model)은 현상에 대한 자발적인 모형(Duit & Glynn, 1996)으로 개별적으로 생성하거나 모둠 내에서 생성된 개인적 모형이다. 정신 모형은 불완전하고, 불안정하며, 비과학적이지만 학습자가 표상하고자 하는 물리적 계를 설명하고 예측한다는 점에서 모형구성에서 중요한 역할을 맡게 된다(Greca & Moreira, 2002).

개념 모형은 연구자, 교사, 기술자들이 계와 세계에 대한 이해를 돕기 위해 만든 것으로 대상이나 현상 및 상황에 대한 외적 표상(Nersessian, 1999)이므로 공동체의 과학적 지식과 일치한다(Greca & Moreira, 2002).

개념 모형은 정신 모형과 대조적으로 안정적이고 완전한 특성을 가지며 수학적 공식이나 비유(analogy), 물질적인 인공물(material artifacts)로써 구체화된다(Greca & Moreira, 2002, Halloun, 2006).

개념 모형은 물리적 실체를 부분적으로 표상함으로써 구성되지만 물리적 실체 혹은 실제 세계를 표상하는 물리적 모형(physical model)은 결국 개념 모형을 물상화(reification)함으로써 구성된다(Halloun, 2006). 즉, 과학적 방법론은 주로 다양한 개념적 도구를 사용하여 계의 특정 유형에 대응되는 개념 모형을 생성하고, 검증하고, 이용하는 것을 의미한다(Halloun, 2006). 예를 들어 등가속도 운동은 역학의 대표적인 개념 모형으로 가속도가 일정한 물체의 운동을 표상한다. 등가속도 운동 모형은 물체의 운동을 부분적으로 표상하지만 고등학생들은 등가속도 운동 모형을 통해 중력장에서 자유 낙하하는 물체에 관한 모형을 구성하게 된다.

학습자들은 모형구성을 통해 정신 모형의 가정을 명료화하고 모호함을 시정함으로써 개념 모형으로의 발달을 경험하게 된다.(Lopes & Costa, 2007). 학생들은 개념 모형을 통해 개념 간의 관계를 정립하고 개념 세계를 구조화한다(Lopes & Costa, 2007). 이를 통해 학습자의 개념 세계에 편입된 개념 모형은 물리적 계에 대한 모형을 구성하기 위한 개념 세계의 요소로 작동하게 된다.

3) 모형구성 도식(modeling schemata)

앞에서의 논의가 모형구성의 일반적인 정의와 관련된 것이었다면 Halloun(2006)은 모형구성에 관한 내적이고 암묵적인 도구를 모형구성 도식(modeling schemata)로 명명하고 모형의 구성 요소와 구조, 모형들 간의 관계, 모형과 개념 간의 관계를 구체적으로 제시하였다. 모형구성 도식은 모형 도식(model schema)과 개념 도식(concept schema)으로 세분화된다(Halloun, 2006). 모형 도식은 모형 영역(domain), 모형 요소(composition), 모형 구조(structure) 및 모형 조직화(organization)의 차원으로 구분된다(Halloun, 2006). 먼저 모형 영역은 모형이 자리하는 공

간으로 모형은 영역 의존적인 특성을 지닌다. 예를 들어 물리적인 계에 대한 복수의 모형이 서로 다른 영역 위치할 때 복수의 모형은 서로 다른 것으로 간주된다. 그러나 모형들이 같은 영역에 존재할 때 두 모형은 서로 다를 수 없다(Halloun, 2006). 모형은 과학 이론을 기반으로 하여 구조화되므로 모형 영역은 그 기반이 되는 과학 이론과 밀접하게 닿아있으며 이론의 대응 규칙(correspondence rules)을 준수한다(이동욱, 2015).

모형 요소는 물리적 세계의 구조나 과정에 대응되는 기능이나 대리하는 객체(Nersessian, 1995, NRC, 1996)를 의미한다. Halloun(2006)에 따르면, 모형 요소는 모형의 실체와 특성을 표상하는 개념들으로써, 실체 개념(entity concept)과 특성 개념(property concept)으로 나눌 수 있다. 실체 개념은 서술자(depictor)라고도 부르며 물리적인 물체(대상과 동인)를 표상하며, 실체 개념은 주로 표상된 물체의 형태론적 양상을 서술하는 기하학적 개념이다. 또 다른 개념인 특성 개념 혹은 기술자(descriptor)는 특정한 유형을 나타내는 계의 구조나 행동에서 일반적이고 중요한 특징을 표상하는 것이다(Reif & Heller, 1982; Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 이 때, 특성 기술자는 물리적 물체의 특성을 표상하는 대상 기술자와 물리적인 실체들의 상호작용을 표상하는 상호작용 기술자로 나뉜다.

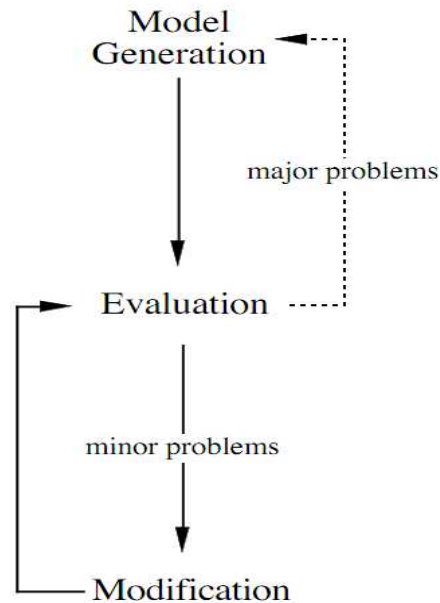
모형 구조는 모형구성에서 개념 세계를 바탕으로 추출된 모형 요소들을 조직화한 것으로 모형 구조는 모형 도식(model schemata)에서 가장 특징적으로 모형을 구별하고 확인할 수 있는 차원이다(Halloun, 2006; 이동욱, 2015). 모형 요소가 건물을 짓는 벽돌이라면 모형 구조는 일관된 개념적 체계에 의해 완성된 건물이라고 할 수 있다(Halloun, 2007). 모형 구조는 학생들이 내적으로 구성한 모형을 가장 특징적으로 대변하는 모형 도식이므로 학생들의 문제해결 과정을 분석하는데 있어 가장 핵심적인 정보를 제공한다(Halloun, 2006). 모형 구조는 세부적으로 위상기하 분면(topology facet), 상태 분면(state facet), 상호작용 분면(interaction facet), 인과 분면(causal facet)의 4가지 분면으로 구성된다(Halloun,

2006). 각각의 분면을 살펴보면, 먼저 위상기하 분면은 대상과 동인(agent)을 적절한 좌표계에 설정하는 것을 의미한다(Halloun, 2006). 상태 분면은 특정한 유형의 기술(description)과 관련되며(Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 적절한 상태 분면은 모형의 대상이 특정한 기준계에서 주어진 상태 기술자를 통해 시간에 따른 변화를 표현한다(Halloun, 2006). 즉, 물체의 초기 상태나 변화 상태에 대한 규칙성을 기술하거나 정의하는 분면이라 할 수 있다(Halloun, 2006). 상호작용 분면은 상호작용 기술자 사이의 상호작용 법칙으로 표현된다(Halloun, 2006; Hestenes, 1987). 예를 들면 만유인력 법칙이나 쿨롱의 법칙, 탄성체에 대한 후크의 법칙이 고전 물리학의 패러다임에서 전형적인 상호작용 법칙이다(Halloun, 2006). 인과 분면은 대상이 기준계 안에서 다른 대상이나 동인(agent)과의 상호작용에 의해 상태 기술자가 어떻게 변해가는 지에 대한 인과 관계를 설명한다(Halloun, 2006).

모형 조직화는 과학적 이론 안에서 모형들 사이의 관계와 위계를 정하는 것이다(Halloun, 2006). 모형 조직화는 모형이 위치하는 영역이 동일한 경우에만 가능하다.

4) GEM 순환

모형구성은 단지 모형을 생성하는 것만을 의미하지 않으며 모형의 평가와 수정까지도 포함한다(Hestenes 1987, 1997; Clement, 2008; Halloun, 2006). Clement(2008)는 모형구성 과정을 GEM 순환으로 설명하였다. GEM은 각각 Generation, Evaluation, Modification을 지칭하며, 초기 모형의 생성(G), 모형의 평가(E), 모형의 수정(M)이 순환적으로 일어남을 의미한다. GEM 순환은 초기 모형이 비판을 수용하여 수정되는 절차를 거쳐 더욱 복잡하고 정교한 일련의 모형들을 고안해가는 과정이다(Clement, 2008).



[그림 2-9] GEM 순환 (Clement, 2008)

2.3.2. 모형구성과 물리 문제해결

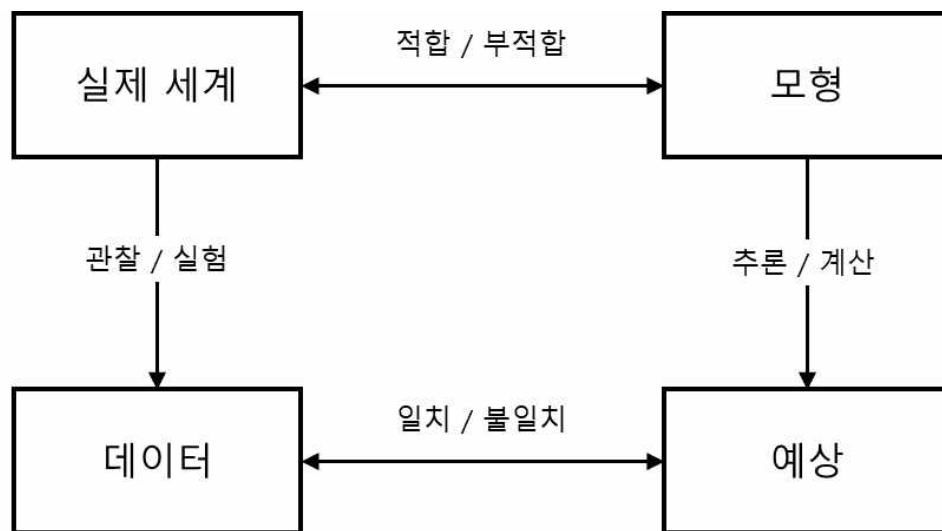
학생들이 정신 모형의 모호함을 시정하고 명료하고 공식화된 개념 모형을 구성하게 되었다고 하여 개념 체계로써의 모형 혹은 이론을 완전히 이해했다고 보기 어렵다(Greca & Moreira, 2002; Halloun, 2006). 물리학의 개념 모형들은 뉴턴 역학과 같은 과학 이론을 구성하는 하위 범주로써 대상을 대리하는 기술자(description)들의 관계를 통해 구체적으로 표현된다. 물리적인 계를 대리하지 않는 개념 모형은 기술자 간의 수학적 관계 혹은 구문에 불과하므로(Uhden *et al.*, 2012) 개념 모형을 기반으로 모형을 구성하고 이를 통해 현상에 대한 설명이 가능해질 때 비로소 개념 모형을 이해했다고 말할 수 있다(Nersessian, 1995; Greca & Moreira, 2002). 새로운 상황에 모형을 적용하는 활동은 학생들에게 개념 모형에 관한 더욱 의미 있고 확장된 지평을 제공하게 된다(Halloun,

2006). 이러한 관점에서 Hestenes(1992, 1997)는 물리 문제와 그 해결 방법이 과학적 지식의 단위가 아니라 모형이 과학적 지식의 단위임을 강조하며 대부분의 문제는 모형을 구성하거나 선택하는 모형 기반 추론(model-based inference)에 의해 해결된다고 주장하였다. 따라서 모형구성의 관점에서는 문제해결이란 학생들이 학습한 개념 혹은 개념 모형들을 문제 상황의 물리적인 계에 적용하고 수정함으로써 개념 모형과 이론을 정교해가는 일련의 과정이라 볼 수 있다(Hestenes, 1987; 1997; Brewe, 2008).

과학 이론의 의미는 계나 대상, 직접적인 관찰을 통해 인식되는 상황에 의해 표현되지 않으며, 이론과 실제 현상과의 관계는 항상 모형에 의해 매개된다(Gilbert *et al.*, 2000, Greca & Moreira, 2002; Uhden *et al.*, 2012). 그러나 모형의 매개는 실제적인 물리 현상이 아니라 물리 현상을 단순화(simplification)하고 이상화(idealization)한 물리적인 계를 기술함으로써 구현된다(Greca & Moreira, 2002). 물리적인 계는 자연의 물리적 현상이 아니라 인간에 의해 인위적으로 구성된 것으로 물리적 현상의 특정 유형 혹은 실체들의 특성을 부분적으로만 표상한다. 따라서 모형은 자연 세계가 아니라 물리적인 계 내부에서만 설명력을 갖게 되나 모형의 타당성은 실제 세계와의 비교를 통해 검증된다(Redish & Bing, 2009). Giere(1990)는 모형이 실제 세계와 이론 사이에서 실제 세계의 현상을 설명하며, 모형의 예상이 경험적 관찰 혹은 실험 결과와 일치할 때 모형이 현상에 대한 설명력을 갖게 된다고 보았다[그림 2-10]. 물리적인 계를 어떻게 설정하는가는 구성하고자 하는 모형이 속한 이론의 대응 규칙에 따라 달라진다(Greca & Moreira, 2002; Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007).

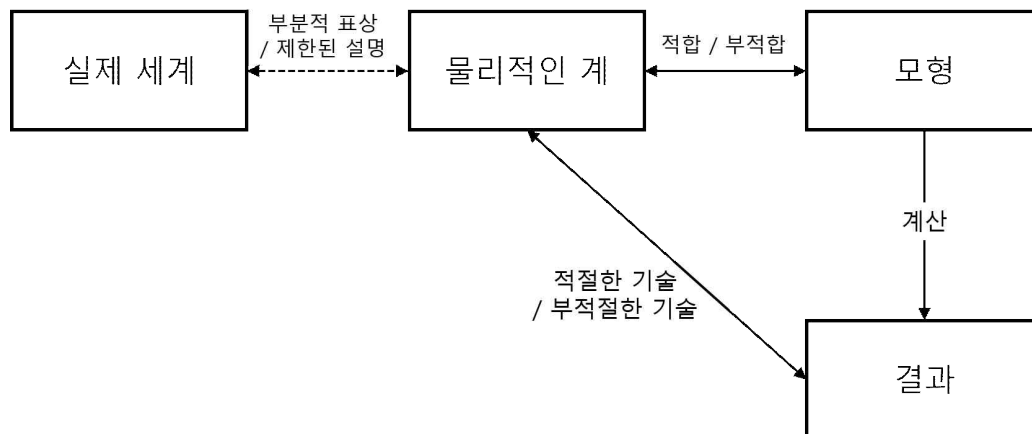
물리 문제해결과 실험 활동 모두 개념 모형을 적용하여 결과를 설명할 수 있는 모형을 구성하는 활동이다. 그러나 실험 활동에서는 모형을 통해 물리적인 계가 구체화되지만 물리 문제해결에서는 물리적인 계가 문제 상황으로 직접적으로 제시된다는 점에서 차이가 있다(Maloney,

1994). 즉, 물리 문제해결이 실제 세계가 아닌 이를 부분적으로 표상하고 있는 물리적인 계를 대상으로 하는 모형구성 활동이라는 점에서 문제에 대한 모형은 실제 세상에 대한 제한적인 설명만이 가능하다[그림 2-11]. 또한 데이터와의 일치 여부를 확인하는 실험 활동과 달리 물리 문제해결은 물리적인 계에 적합한 개념 혹은 개념 모형을 기반으로 기술했는가 여부로 그 적합성이 판별된다(Halloun, 2006).



[그림 2-10] 실제 세계의 매개체로서의 모형(Giere, 1990)

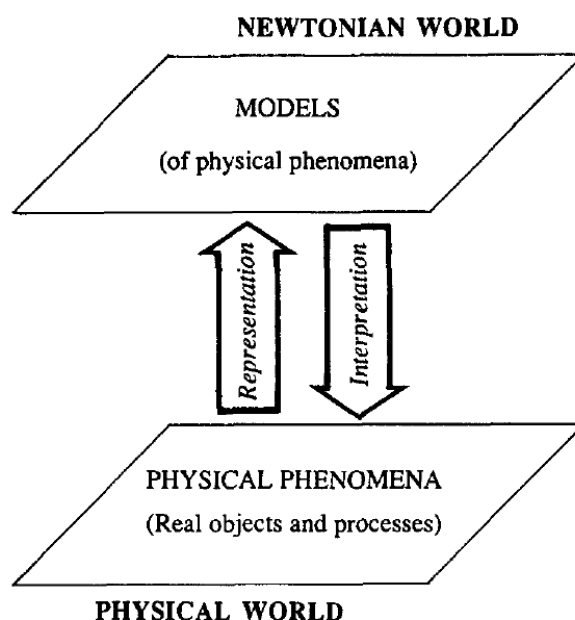
실제 세상이 아닌 물리적인 계에 대한 모형을 구성한다는 점에서 물리 문제해결은 새로운 과학적 지식 혹은 모형을 생성하는 귀납적인 과정은 아니다(Hestenes, 1992). 물리 문제해결은 모형 예증(adduction), 모형 연역(deduction)과 관련된 활동으로써 물리적인 계에 대한 모형을 구성하기 위한 조건들을 명료화하는 과정이다(Halloun, 2006). 학생들은 이러한 과정을 거침으로써 정신 모형을 개념 모형으로 변화시키고 개념 모형의 기능을 더욱 폭넓게 이해하게 된다(White & Frederiksen, 1990; Halloun, 2006).



[그림 2-11] 모형구성 관점에서 해석한 물리 문제해결 과정

물리 문제가 주로 물리적인 계를 대상으로 이루어진다고 하여 실제 세계의 현상에 관한 문제해결이 완전히 논외의 것은 아니다. Lopes & Costa(2007)의 상황 문제(situation-problem)는 단순하고 이상화된 것으로 물리적인 계가 아니라 실제 세상을 대상으로 한다. 이를 위해서는 실제 세상을 물리적인 계로 표상하는 과정에 대한 구체적인 논의를 필요로 한다. Lopes & Costa(2007)가 제시한 모형구성 요소 중 개념화(conceptualization)는 실제 세상을 물리적인 계로 표상하는 구체적인 방안에 관한 것이다. 대상과 사건에 관한 개념화들의 일관성을 확인하는 것은 이론과 모형, 개념의 정합(Halloun, 2006)으로 이해될 수 있다. 즉, 학생들이 이상화된 물리적인 계가 아닌 실제 자연 현상에 대한 설명 체계, 모형을 구성하기 위해서는 실제 세계의 현상을 이론의 영역에 위치시켜 물리적인 계로 표상하는 활동이 요구된다. 그러나 중등학교 현장에서 이러한 형태의 문제해결은 드물며 대부분 이상화되고 단순화된 표준 문제들에 대한 활동이 주를 이룬다. 이로 인해 학생들에게 물리 이론은 이론적인 세상에서만 존재하며 실제 세상에 구현 가능성이 없는 것으로 간주되고 있다. Lopes & Costa(2007)의 연구는 실제 세계의 현상에 관한 문제해결 활동이 무엇을 의미하며 이를 위해 어떤 능력의 함양이 필요한지 구체적으로 제시하고 있다는 점에서 그 의미를 찾을 수 있다.

한편, 모형구성의 관점을 통해 물리 문제해결에 학생들이 겪는 어려움에 대한 더욱 명료한 해석이 가능하다. 2.2.2절에서 언급한 바와 같이 많은 학생들은 물리 문제해결을 공식들의 적절한 공식을 조합하는 수학적 계산과정으로 인식하고 있다. 이를 모형구성의 관점에서 보면 많은 학생들이 답을 도출하는데 그치며 모형을 통해 물리적인 계를 해석하는 과정을 수행하지 않기 때문에 해석할 수 있다. 모형은 주어진 상황에 대한 답을 제공할 뿐만 아니라 계의 특정 유형을 해석하고 설명하는 기능을 갖는다(Hestenes, 1987, 1992; Greca & Moreira, 2002; Halloun, 2006) [그림 2-12]. Hestenes(1992)은 문제해결에 대한 인식론적 편견은 모형의 설명적 기능을 강조함으로써 극복할 수 있다고 믿는다. 즉, 학생들이 물리 문제해결이란 이론의 영역 안에서 문제 상황에 대한 설명 체계를 구성하는 과정임을 인식하여 수행한다면 단순한 정답 찾기 이상의 물리적 의미를 이해할 수 있다는 것이다(Hestenes, 1992).



[그림 2-12] 모형과 물리적 현상의 관계
(Hestenes, 1992)

또한 Brewe(2008)는 문제해결은 모형을 개발하고 적용하는 과정임을 강조하고 이를 통해 다른 과학 혹은 공학 분야에서도 전이될 수 있는 모형구성 능력을 기를 수 있음을 강조하였다.

마지막으로 모형구성 이론은 문제해결과 관련된 많은 선행연구들이 제시하고 있는 명제적 지식과 절차적 지식에 대해 새로운 입장을 제시한다. 모형구성의 관점에서 명제적 지식은 개념 도식(concept schemata)이며 절차적 지식은 모형 도식(model schemata)로 이해될 수 있다. 개념 도식은 개별모형을 구성하는데 필요한 개념들의 구성과 활용에 관한 서식(template)으로 범위, 표상, 조직화, 수량화로 세분화된다(Halloun, 2006). 학생이 개념 도식 중 하나의 차원만을 알고 있다고 하여 개념을 온전히 이해하고 있다고 할 수 없다. 개념은 모형의 요소로써 모형의 구조를 만들어가는 과정을 통해 그 물리적인 의미가 분명해진다(Halloun, 2006). 또한 개념들은 모형 안에서 다른 개념 간의 관계 맺음을 통해 과학 이론을 구성하는 법칙과 기본 모형으로 작동하기도 한다(Halloun, 2006). 따라서 명제적 지식에서 말하는 개념, 법칙, 이론 등은 각자가 독립적이고 개별적인 지식이 아니라 상호 연관된 체계이며, 물리적인 현상이나 계에 관해 모형을 구성하는 과정을 통해 그 물리적인 의미가 분명해진다. 모형 도식은 개념 도식을 통해 물리적인 계와 관한 모형을 구성하기 위한 정신적 도식(Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007)이다. 결국 모형구성 관점에서 명제적 지식과 절차적 지식은 독립적인 지식 체계가 아니며 상호 보완과 결합을 통해 학습되어 가는 인지적 도식, 즉 모형구성 도식(modeling schemata)이다(White & Frederiksen, 1990; Halloun, 2006). 따라서 물리학습에서 지식의 단위는 이론을 구성하는 개념 모형으로 새롭게 전환되어야 한다(Hestenes, 1997; Brewe, 2008). 모형구성 관점을 도입함으로써 개념의 이해와 활용 방법의 습득이라는 모호하고 일반론적인 이분법적 사고에서 벗어나 물리 문제학습이 지향하는 바를 더욱 구체적으로 이해할 수 있다.

본 연구에서는 앞에서 논의한 선행 연구들을 바탕으로 모형구성 관점

에서의 물리 문제해결을 다음과 같이 정의하고자 한다.

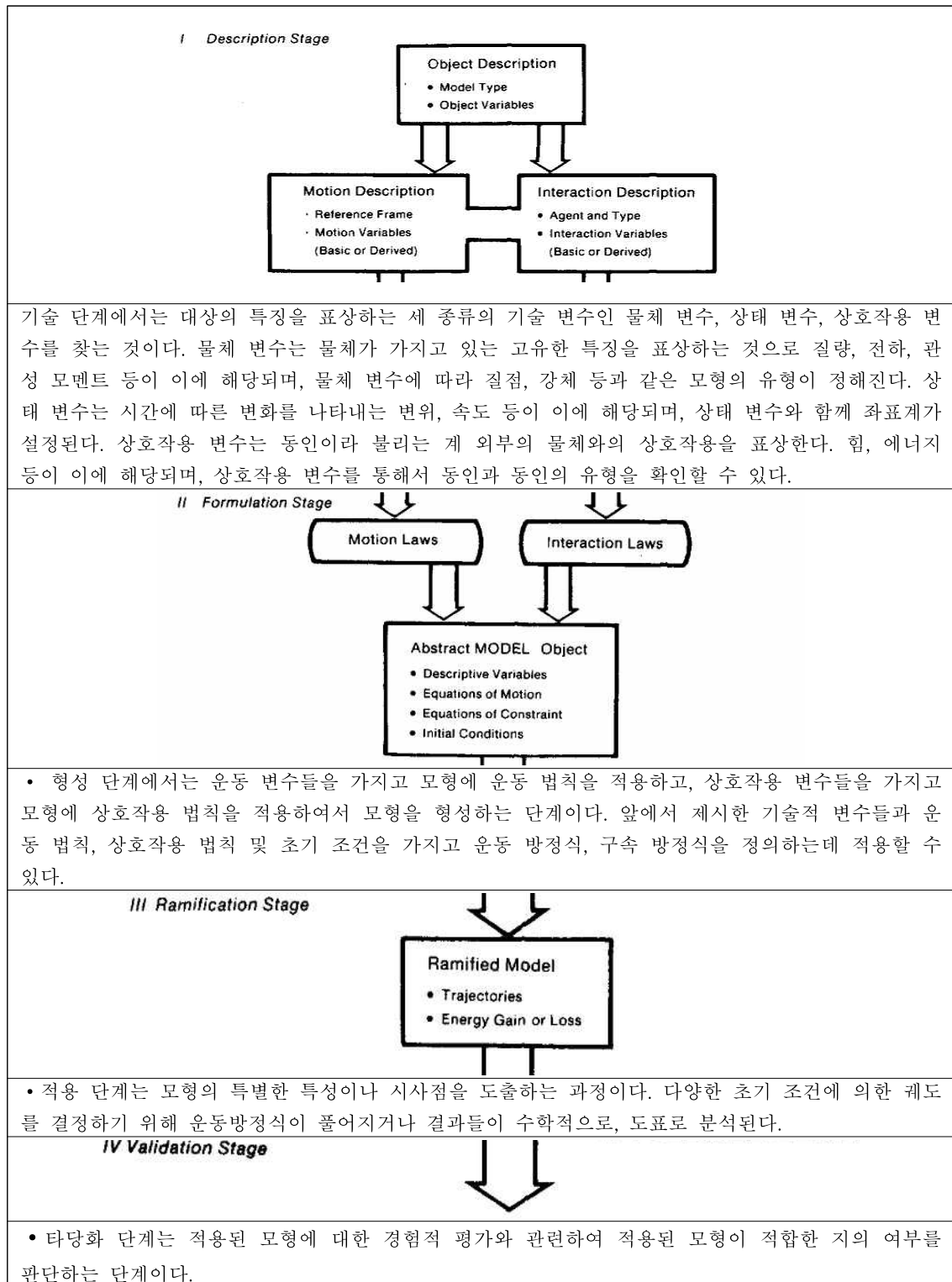
“물리 문제해결이란 학습자들이 사전에 가지고 있던 개념 세계를 기반으로 문제 상황에 대한 설명 체계, 즉 모형을 구성해가는 일련의 탐구 활동을 의미한다.”

2.3.3. 모형구성의 분석틀

본 절에서는 물리 문제해결을 모형구성 관점에서 해석한 선행 연구들을 참고하여 본 연구에서 사용할 모형구성의 분석틀을 제안하고자 한다.

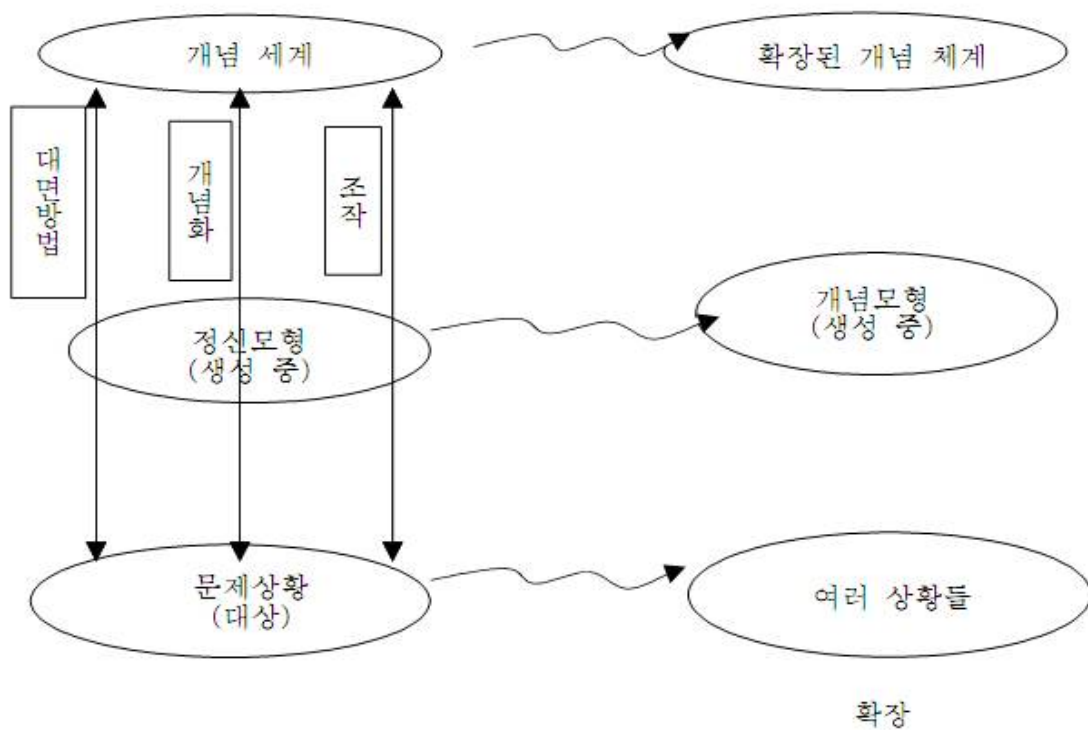
먼저, Hestenes(1987)은 물리적 상황에 대한 모형을 생성하기 위해 이론을 적용하는 인지적 과정을 모형구성으로 정의하고 물리 문제해결 과정을 수학적 모형구성의 과정으로 이해할 수 있다고 주장하였다. Hestenes(1987)에 따르면 수학적 모형은 다음과 같은 4가지 구성 요소를 가지고 있다. 모형에서 표상이 되는 대상(object)과 대상과 상호작용 하는 동인(agents), 대상의 특징을 표상하는 세 종류(대상, 상태, 상호작용)의 기술자들(descriptor), 모형의 구조와 시간에 따른 변화를 기술하는 모형의 방정식, 기술 변수들과 모형이 표상하고 있는 대상들의 특징을 연결시키는 해석이 4가지 구성 요소이다. Hestenes(1987)의 물리적 대상에 관한 4가지 구성 요소를 구성하기 위해 과학적, 수학적 지식을 적용하여 모형을 구성하는 단계를 [표 2-10]과 같이 제시하였다.

[표 2-10] 역학에서의 모형구성 단계(Hestenes, 1987)



Hestenes(1987)의 연구는 물리 문제해결을 모형구성의 관점에서 해석한 선구적인 시도라는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다. 그러나 모형구성의 역동적인 상황을 지나치게 선형적으로 해석했다는 점과 이론과 개념 세계의 역할이 모형구성에서 명확하게 드러나지 않는다는 점에서 비판의 소지가 있다.

Lopes & Costa(2007)는 모형구성 능력을 정보와 지식을 동원, 선택, 사용하여 상황을 효과적으로 표현하는 능력이라고 하였다. Lopes & Costa(2007)는 [그림 2-13]과 [표 2-11]과 같이 문제 상황에 대한 모형구성 능력을 개념화하기 위하여 모형구성의 차원을 도입하였다



[그림 2-13] 모형구성 능력 차원(Lopes & Costa, 2007)

[표 2-11] 모형 구성 차원의 세부 항목과 정의(Lopes & Costa, 2007)

모형구성 요소	세부 항목	조작적 정의
대면	개념의 특성 혹은 개념 간의 관계를 사용하기 위한 조건	특정한 실험적 조건과 추론 조건의 존 재 유무를 기준으로 개념의 특성 혹은 개념 간의 관계를 적용하는 것에 대한 적합성을 분석
	상황-문제에 대한 주의 깊은 분석	추론 조건의 설명 수단과 답의 유형을 통해 학생들이 상황을 주의 깊게 분석 했는지, 아니면 공식을 즉각적으로 사 용했는지를 확인
개념화	대상의 개념화	학습자가 대상의 특성을 유추
	사건의 개념화	학습자가 사건의 특성을 유추
	적합성과 일관성	대상과 사건의 개념화가 문제 상황에 적합하고 상호 간에 일관성이 있는지 평가
	변인들 간의 관계	물리적이고 정량적 변인들의 관계를 일관되게 기술
조작	관계들의 유형	관계가 정성적인지, 정량적인지 아니면 결정할 수 없는지를 확인
	사용된 정량적 변인들	사용된 정량적 변인들을 열거
	예측 능력	답이 시간에 따른 정량적 변인들의 변 화를 예측할 수 있는 능력을 가졌는지 확인
	특정 조작의 명료화	시간에 따른 분리, 좌표계 선택, 계와 상호 작용의 식별, 벡터의 분해와 같은 특정이고 반복적인 절차를 인식
	상징적 언어	사용된 언어들의 유형을 기술

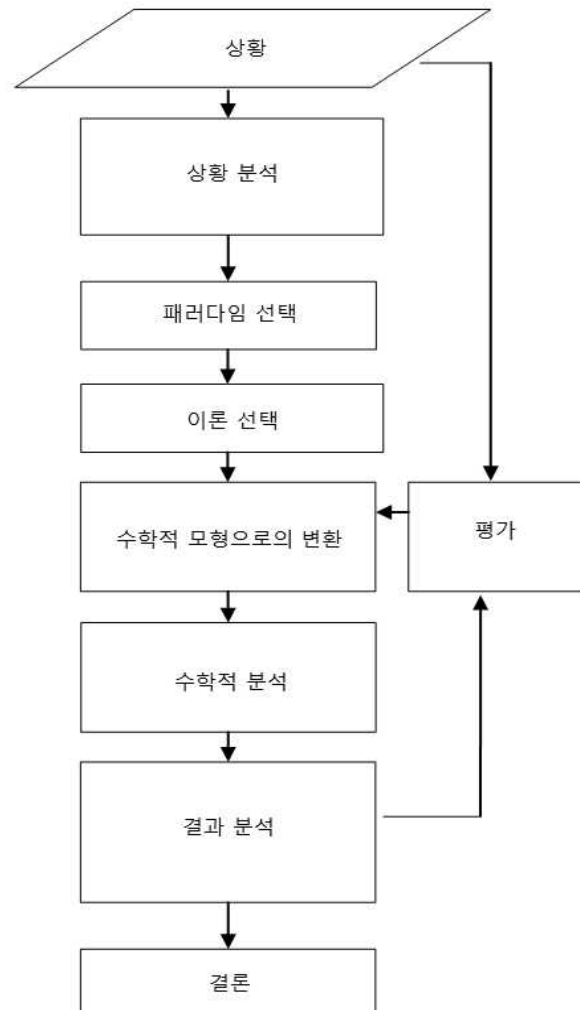
모형구성의 차원은 대면(way of facing), 개념화(conceptualization), 조작(operative work)의 세 차원으로 이루어진다(Lopes & Costa, 2007). 대면은 학생들이 상황-문제(situation-problem)를 분석하는 방식과 개념이나 개념들 사이의 관계에서 그 특성들의 사용 조건과 관련된다(Lopes & Costa, 2007). 개념화는 대상(object), 사건(event), 혹은 전체 상황-문제를 개념화하기 위해서 정신적 도식(mental schema)를 동원하여 개념들 간에 일관성이 있는지 상황-문제에 적합한지 확인하는 과정을 의미한다(Lopes & Costa, 2007). 조작은 답을 찾기 위해서 변수들이나 절차들 사이의 관계와 같은 정신적 도식(mental schema)의 양상과 함께 상징적 표현 체계를 사용하는 것을 나타낸다(Lopes & Costa, 2007).

Lopes & Costa(2007)의 연구는 모형구성에 필요한 역량을 세분화하여 기술하는 것이 목적이었으므로 [표 2-11]을 모형구성 과정 혹은 절차로 해석할 수는 없다. 그러나 상황 문제에 대한 모형을 구성하기 위한 개념 세계의 역할과 모형과의 관계를 시각적으로 제시함으로써 Halloun(2006)과 Hestenes(1987, 1997)에 비해 모형구성에서 개념 세계의 역할을 구체적으로 설명하고 있다. 또한 정신 모형이 개념 모형으로 발달되는 과정을 거쳐 학습자의 개념 세계가 확장되고 설명할 수 있는 상황의 폭이 넓어진다는 관점은 모형구성 이론에서 주장하는 물리학습에서의 개념 이해와 발달에 관해 구체적인 상을 제시한다.

Niss(2012)는 이상화되고 단순화된 물리적인 계가 아닌 실제 세계에 대한 문제해결을 모형구성에서 해석하였다. 실제 세계는 전형적인 물리의 언어로 표현되어 있지 않으므로 물리학을 사용하여 이해할 수 있는 형태로 재구성되어야 한다. 이 단계를 상황 분석이라 부르며 실제 세계의 특정 맥락을 중심으로 물리적인 계는 이상화되고 단순화된다(Niss, 2012). 다음 과정은 문제를 해결하기 위해 어떤 이론을 사용할 것인가를 결정하는 패러다임 선택이다. Niss(2012)가 말하는 패러다임 선택은 실제 세상에 대한 문제를 결정할 때는 매우 중요한 단계임이 분명하나 표준화된 문제의 경우 고전 역학과 상대성 이론 중 어느 것을 선택하여 문

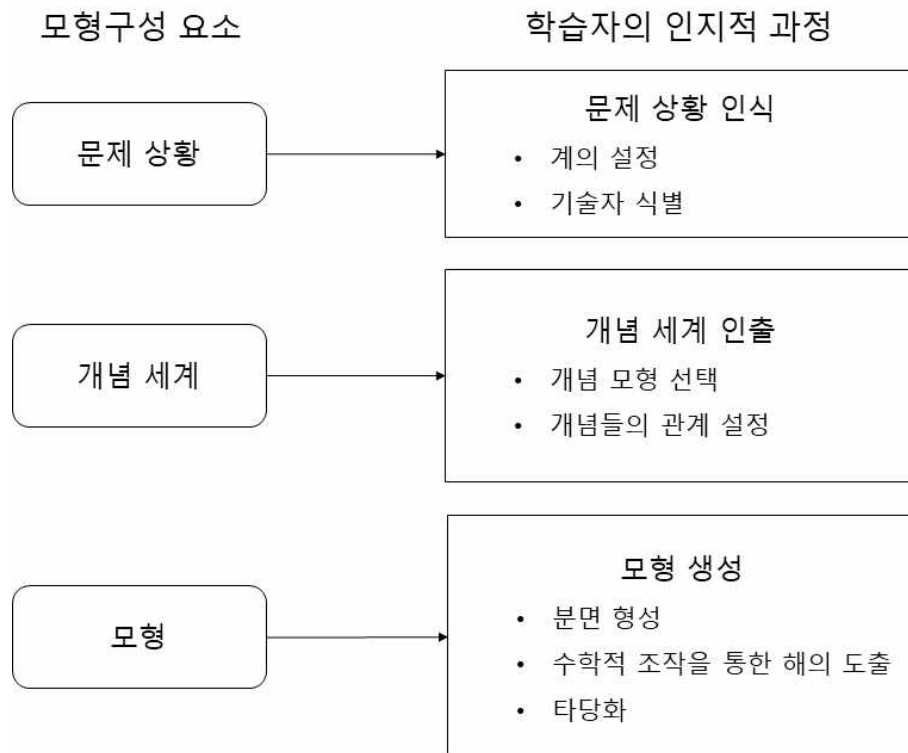
제를 해결한 것인가와 같은 선택을 할 경우는 거의 없다. 그러나 고전 역학이라는 패러다임 내에서 뉴턴 역학을 사용할지 랑그라주 역학을 사용할지에 대해서는 학습자가 결정할 여지가 있다. 이와 같이 선택된 패러다임 내에서 적절한 이론 혹은 원리를 선택하는 것이 이론 선택 과정이다. 이론을 선택한 학습자는 물리적 구조를 수학적 구조로 변환시키는 과정을 수행하게 되는데, 이를 수학적 모형으로의 변환이라고 부른다(Niss, 2012). 이는 문제의 상황을 수학적인 용어로 기술함은 물론, 수학적인 방정식으로 표현하는 것을 포함한다. 이때 수학적으로 표현된 법칙과 기본 모형들이 물리적인 계의 구조에 적용된다(Niss, 2012). 결과를 도출하기 위하여 학습자들은 수학적인 방법을 통해 구성된 모형을 분석하게 되는데 이를 수학적 분석이라고 한다(Niss, 2012). 수학적 분석 결과를 통해 모형은 물리적인 계의 특정 유형 기술하게 된다(결과 분석). 최종적으로 모형은 문제의 본래 목적과 내적 타당성에 의거하여 평가받게 되며(평가), 모형이 적합하다는 평가가 내려진다면 실제 세계의 상황은 모형의 결과를 통해 묘사된다(결론)(Niss, 2012).

Niss(2012)의 관점은 모형구성의 관점에서 패러다임과 이론, 수학을 문제해결과 매끄럽게 연결하여 기술하고 있다. Hestenes(1987)와 달리 이론의 선택과정을 부각했다는 점 역시 문제해결의 핵심적인 과정을 모형구성 관점 적절하게 기술했다고 평가할 수 있다. 그러나 표준화된 문제 상황이 아닌 자연의 실제 상황에 대한 문제해결을 분석의 대상으로 했기 때문에 표준화된 문제를 다루는 본 연구의 맥락과 다소 어긋난다. 또한 기본 모형을 선택하고 적용하는 과정을 수학적 모형으로의 변환에 포함시킴으로써 모형의 구조를 생성해가는 과정에서 수학적인 측면을 지나치게 강조한 부분이 없지 않다.



[그림 2-14] 모형구성으로서 문제해결
(Niss, 2012)

앞에서 다룬 선행 연구들의 관점을 바탕으로 본 연구에서 정의하는 모형구성의 분석틀에 대한 논의를 시작하고자 한다. 앞 절에서 정의한 바와 같이 물리 문제해결은 학습자가 사전에 가지고 있던 개념 세계를 기반으로 문제 상황에 대한 설명 체계, 즉 모형을 구성하는 과정으로 이해할 수 있다. 따라서 물리 문제에 대한 모형 구성은 문제 상황, 개념 세계 및 모형, 이 세 가지 요소에 관한 인지적 과정을 통해 구체화된다고 할 수 있다.



[그림 2-15] 모형구성 요소와 학습자의 인지적 과정

먼저 문제 상황 인식은 문제 상황의 정보들을 분석하여 물체들을 대상과 동인으로 구별하여 계를 설정하고, 계의 상태와 상호작용을 기술자(descriptor)로 인지하고 이들을 식별함을 의미한다(Hestenes, 1987, 1997; Halloun, 2006). 기술자란 특정한 유형을 가지는 계의 구조나 행동에서 일반적이고 중요한 특징을 표상한 것으로 대상의 운동을 기술하고 다른 물체들과의 상호작용을 통해서 변할 수도 있는 특성을 표상하는 것이다(Reif & Heller, 1982; Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 상호작용 기술자란 두 개 혹은 그 이상의 물리적 실체들이 서로에게 작용하는 상호작용을 표상하는 것으로, 상호작용 기술자는 계 내부에서 대상들의 상호작용(내부 상호작용)을 표상하기도 하며 계 외부의 동인과 대상의 상호작용(외부 상호작용)을 표상하기도 한다(Halloun, 2006). 상태 기술자는 대상의 위치, 운동에 관한 것으로 물리적 물체의 행동을 특징짓고 다른

물체들과의 상호작용을 통해서 변할 수도 있는 특성을 표상한다(Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 속도, 운동량, 가속도 등이 상태 기술자의 예이다.

문제 상황 인식을 바탕으로 학습자는 계의 상태를 기술하고 설명하기 위해 자신의 개념 세계에서 적절한 요소들을 선택하게 되는데 이를 개념 세계 인출(retrieval)로 정의하였다. Hestenes(1987)가 기술자를 이론과 법칙에 어떻게 연관시키는가에 대한 명확한 설명을 하지 않은 것과 달리 Halloun(2006)은 개념 모형의 대응 규칙 하에 계의 기술자들이 조직되고 연관된다고 주장한다. 즉, 개념 세계의 인출은 개념 모형의 선택을 중심으로 이루어지는데, 개념 모형이란 이론에서 다루는 전형적인 현상에 대한 외적 표상을 의미하며(Nersessian, 1999) 기본 모형(Basic model), 일반 모형(General model) 등으로 불린다. 개념 모형은 공동체의 물리적 지식의 단위인 동시에 개념들의 관계를 규정하는 역할을 함으로써 이론의 하부 요소를 구성한다(Hestenes, 1997; Greca & Moreira, 2002, Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007; Brewster, 2008). 따라서 어떤 개념 모형을 선택하는가에 따라 연관되는 개념들의 특성과 관계가 다르게 설정된다. 결국 개념 모형 선택은 단순한 공식의 상기가 아니라 계의 특성에 부합되도록 개념들의 표상인 기술자들의 관계를 설정하는, 개념 세계 인출의 핵심적인 과정으로 볼 수 있다. 고등학교 물리에서 다루는 뉴턴 역학의 대표적인 개념 모형으로 등가속도 운동, 등속직선 운동을 들 수 있다. 계가 일정한 가속도로 운동하는지 일정한 속도로 운동하는지에 따라 학습자가 선택하는 개념 모형은 달라진다. 이때 계의 상태를 표상하는 거리와 속도, 가속도 등의 상태 기술자들은 등가속도 운동 모형에서 $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ 로, 등속직선 운동에서는 $s = vt$ 로 각각 그 관계가 다르게 설정된다.

선택된 개념 모형을 토대로 학습자는 문제 상황을 기술하는 모형을 생성하게 된다. Hestenes(1987)은 모형을 상태와 상호작용의 수식으로 모

형을 제안했으나 이는 모형의 기술적인 특성만을 염두에 둔 것이다. 모형은 그 역할에 따라 설명적인 기능을 수행하기도 하므로(Halloun, 2006) 상태와 상호작용 측면만으로 모형의 전체적인 구조를 기술하기에는 부족하다. Halloun(2006)은 이에 대해서 네 가지 모형 도식(model schemata) 중에서 모형의 전체적인 특징을 드러내는 것은 바로 모형 구조라고 주장하였다.

모형 구조는 위상기하 분면, 상태 분면, 상호작용 분면, 인과 분면으로 세분화된다. 위상기하 분면은 대상의 상태 혹은 상태 변화를 기술하기 위한 좌표계 설정과 관련된 것이다(Halloun, 2006). 상태 분면은 모형의 대상이 특정한 기준계에서 주어진 상태 기술자를 통해 시간에 따른 변화를 표현한다(Halloun 2006). 즉, 물체의 초기 상태나 변화 상태에 대한 규칙성을 기술하거나 정의하는 분면이라 할 수 있다(이동욱, 2015). 상태 분면에서 상태의 규칙성은 속도, 가속도, 위치 등의 상태 기술자로 표현되며 이들 사이의 관계는 개념 모형의 대응 규칙에 따라 결정된다. 상호작용 분면은 상호작용 기술자 사이의 상호작용 법칙으로 표현되며(Hetenes, 1987; Halloun 2006), 계의 설정에 따라 내부 상호작용과 외부 상호작용이 구분되어 상호작용 분면을 구성하게 된다. 고등학교 물리 I에서 다루는 대표적인 상호작용으로는 중력, 장력, 마찰력 등을 들 수 있다. 인과 분면은 대상이 기준계 안에서 다른 대상이나 동인(agent)과의 상호작용에 의해 상태 기술자가 어떻게 변해가는 지에 대한 인과 관계를 설명한다(Halloun 2006). 뉴턴 역학 내에서는 운동 2법칙을 통해 인과 관계를 기술한다. 이와 비슷하게 Hestenes(1997)도 그의 후속 연구에서 모형의 구조를 기하학적 구조, 상호작용 구조, 상태 구조, 시간(temporal) 구조 등으로 Halloun(2006)의 모형 분면과 거의 동일하게 세분화하였다.

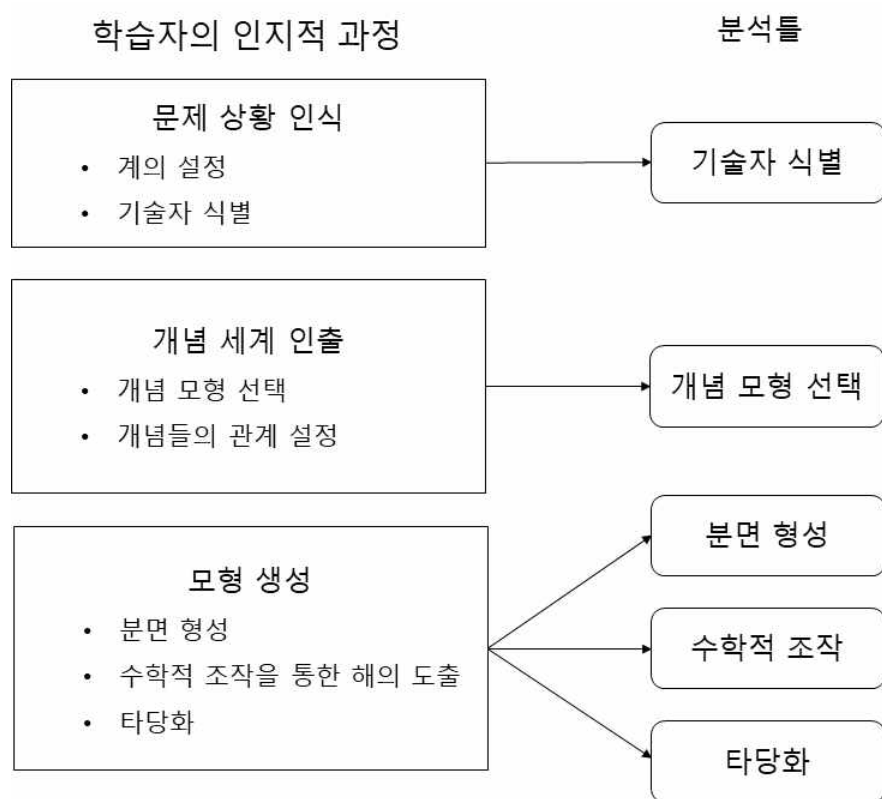
본 연구에서는 모형의 구조를 형성하는 인지적 과정을 분면 형성으로 정리하였으며, 모형의 구조는 상태 분면, 상호작용 분면, 인과 분면으로 구체화된다.

분면들에 대한 수학적 분석과 계산을 통해 학습자는 문제 상황에서

요구하는 대상의 상태나 상호작용 등에 관한 해를 도출해야 한다(Niss, 2012). 본 연구에서 이러한 인지적 과정을 수학적 조작으로 정의하였다. 이 과정에서 문제의 정량적인 초기 조건들이 모형에 적용되며, 표상간의 전환이 이뤄지기도 한다(Hestenes, 1987; Lopes & Costa, 2007). 타당화는 수학적 조작 결과 도출된 해를 기준으로 모형의 대응 여부를 판단하는 단계이다. 본 연구에서는 문제 상황에 적합한 해가 도출되어 모형이 타당한 설명력을 가지게 되는 것을 모형 대응(model correspondence)이라고 정의하였다. 모형 대응의 기준을 크게 모형 내적인 요인과 외적인 요인으로 나뉘서 살펴볼 수 있다. Niss(2012)는 내적 요인을 타당성(validity), 외적 요인을 목적(purpose)의 부합으로 나뉘서 모형의 대응 기준을 제시하였다. 타당성은 모형이 문제 상황의 물리적인 계를 적합하게 대리하고 있는지를 의미하며 이를 위해 분면 간의 정합과 수학적 일관성을 내포하고 있어야 한다(Bing & Redish, 2009; Niss, 2012; Lee & Yoo, 2017). 문제 목적과의 부합은 모형이 문제에서 요구하는 정밀함을 충족하거나 문제에서 제시하고 있는 보기 중의 하나와 모형의 해가 일치해야 함을 의미한다(Hestenes, 1997; Niss, 2012).

모형구성 요소에 관한 학습자의 인지적 과정 분석을 통해 본 연구의 모형구성 분석틀을 [그림 2-16]과 같이 정의하였다. 학습자의 인지적 과정을 모형구성의 분석틀로 그대로 활용하지 않지 않은 이유는 학습자의 인지적 과정은 모형구성에 관한 이론적 논의이며 실제 학습자들의 모형구성은 이와 다르게 진행되거나 명시적으로 확인하기 어려운 요소들을 포함하기 때문이다. 그 대표적인 예로 계의 설정을 들 수 있다. Ji *et al.*(2016)에 따르면 많은 물리교육을 전공하는 대학생들조차 계의 설정과 구분, 요소에 대한 명확한 인식이 없거나 이를 역학 문제해결에 활용하지 않고 있다. 따라서 문제 상황 인식에서 명확하게 계를 설정하지 않고 대상들의 기술자만을 식별한 뒤 모형 생성에서 계의 설정이 일어날 수도 있다는 점에서 문제 상황 인식에서 기술자 식별만을 분석의 대상으로 선정하였다. 또한 개념 세계 인출에서 개념 모형 선택만을 분석틀에 포함

시킨 이유는 학생들의 모형구성 과정에서 개념 모형 선택과 개념간의 관계 설정간의 구분이 명확하지 않기 때문이다. 실제 학교 현장에서 학생들은 개념 모형에 대한 인식이 불분명하며 개념들의 관계를 직접적으로 문제 상황에 적용하기도 한다(Lopes & Costa, 2007). 또한 개념 모형의 선택은 그 자체로 개념들의 관계 설정을 의미하기도 한다(Halloun, 2006). 따라서 모형구성의 분석틀에서는 이 둘을 구분하지 않고 개념 모형 선택으로 통합하여 개념 세계 인출을 분석하고자 한다.



[그림 2-16] 본 연구의 모형구성의 분석틀

[표 2-12]에서 본 연구의 모형구성 분석틀의 정의에서 참고했던 선행 연구들의 모형구성과 본 연구의 모형구성의 과정을 비교하여 정리하였다. [표 2-13]에서는 분석틀의 각 단계에 대한 설명을 요약하였다.

[표 2-12] 본 연구와 선행 연구의 모형구성 과정 비교

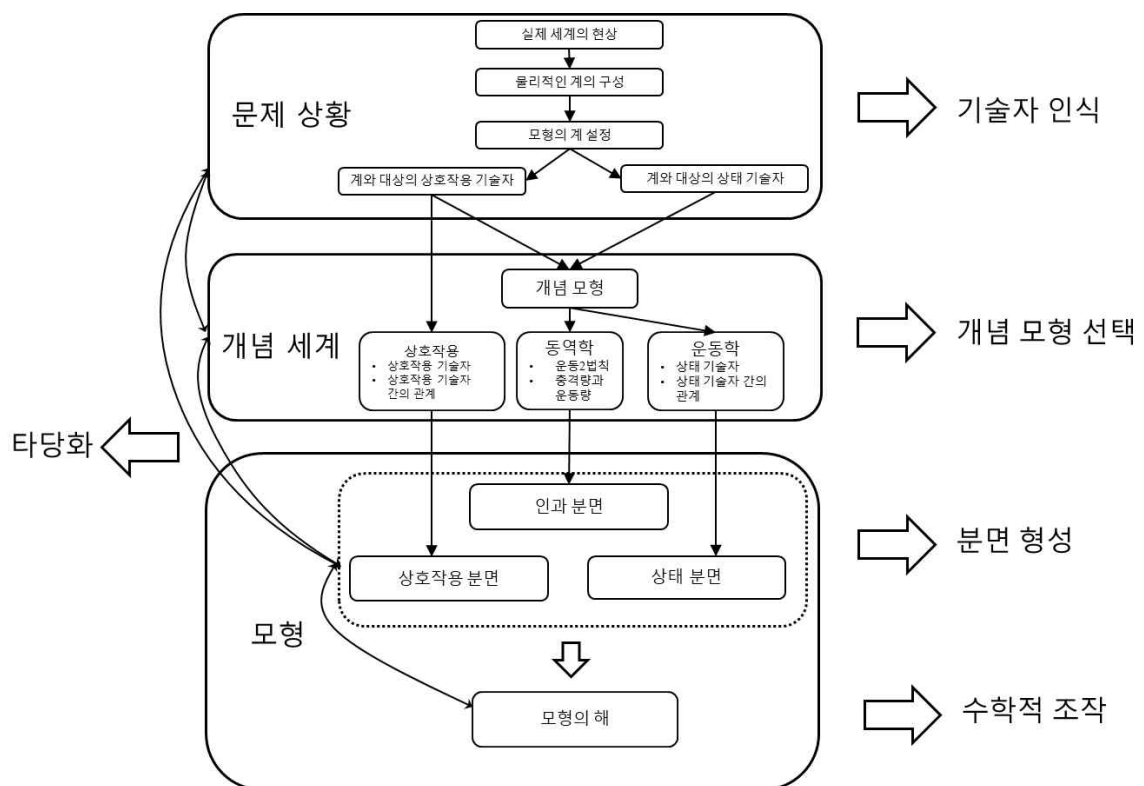
Hestenes (1987)	Lopes & Costa (2007)	Niss (2012)	본 연구
기술 단계	개념화	상황 분석	기술자 식별
x	대면	수학적 모형으로의 변환	개념 모형 선택
형성 단계	조작	수학적 모형으로의 변환	모형 생성
적용 단계	조작	수학적 분석, 결과 분석	수학적 계산
타당화 단계	x	평가	타당화

모형구성의 분석틀의 각 단계와 모형구성 요소와의 관계를 [그림 2-17]에 도식화하였다. 물리 문제는 있는 그대로의 실제 세계를 대상으로 하는 문제와 실제 세계를 이상화하고 단순화한 표준 문제로 나눌 수 있다. 있는 그대로의 실제 세계를 다루는 문제의 경우 실제 세계의 특정 유형과 실체들을 표상한 물리적인 계의 구성이 선행되어야 한다. 이때의 물리적인 계의 구성은 모형의 영역, 즉 패러다임과 이론의 대응 규칙을 준수해야 하며(Halloun, 2006) 문제 상황의 물리적인 계와 대상은 같은 이론을 기반으로 상호 간의 모순이 없어야 한다(Lopes & Costa, 2007). 표준 문제의 경우 문제 상황이 직접적인 물리적인 계의 형태로 제시되기 때문에 위와 같은 과정이 생략된다고 볼 수 있으며 일반적인 고등학생들이 접하는 교과서나 학교 정기고사의 문항들이 이에 해당된다. 문제의 물리적인 계를 구성되거나 제시되면 학습자는 문제에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용을 기술하기 위한 모형의 계를 설정하게 된다. 어떤 대상들을 포함하여 모형의 계를 설정하는가에 따라 생성된 모형이 기술하

[표 2-13] 모형구성 분석틀의 단계

단계	설명
기술자 식별	문제 상황의 물리적 실체들을 대상과 동인으로 구분하여 모형의 계를 구성하고 대상의 상태와 외부와의 상호작용을 기술자(descriptor)로서 인식
	1) 상태 기술자 대상의 행동을 특징짓고 다른 대상이나 동인과의 상호작용을 통해서 변할 수 있는 특성을 표상. 2) 상호작용 기술자 두 개 이상의 물리적 물체들이 서로에게 작용하는 상호작용을 표상.
개념 모형 선택	계의 상태를 기술하고 설명하기 위해 학습자가 사전에 갖고 있던 개념 모형들의 적합성을 판별하고 선택
분면 형성	계의 상태와 상호작용 기술자들을 적절한 개념 세계의 요소들과 연관 지어 모형이 문제 상황의 특정 유형을 대리하는 구조를 구성하는 과정
	1) 상태 분면 대상의 초기 상태나 변화 상태에 대한 규칙성을 기술하거나 정의 2) 상호작용 분면 대상과 대상, 대상과 동인과의 상호작용을 정의 3) 인과 분면 대상이 다른 대상이나 동인과의 상호작용에 의해 상태가 어떻게 변해 가는 지를 인과 관계에 의해 설명
수학적 조작	초기 조건들을 적용하여 문제 상황에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용, 특성과 관련된 해를 수학적으로 도출 모형의 내적 요인과 외적 기준으로 모형의 대응 여부를 판단하는 단계.
타당화	1) 내적 요인 문제 상황과 모형 구조의 동형성, 선택된 개념 모형의 적합성, 분면간의 정합, 수학적 일관성 2) 외적 요인 문제에서 요구하는 해의 정밀함. 해와 제시된 보기와의 일치

고 설명할 수 있는 물리적인 계의 범위가 달라진다. 계의 설정에 따라 계 외부와 계 내부의 상호작용이 구분되며 계에 속한 대상들의 운동이 상태 기술자로서 식별함으로써 기술자 식별이 마무리된다.



[그림 2-17] 모형구성 분석틀의 각 단계와 모형구성 요소와의 관계

학습자의 개념 세계를 [그림 2-6]의 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조를 적용하여 표현하였다. 물리 문제해결에서는 개념 모형이 개념 세계의 중심이 되며 개념 모형을 선택했는가에 따라 동역학과 운동학의 세부 개념들의 관계가 설정된다. 상호작용과 관련된 개념들은 특정 개념 모형과 연관성이 약해 독립적인 측면이 강하다. 예를 들어 힘의 합성은 상호작용 기술자간의 관계에 해당되는 개념이지만 이는 특정한 개념 모형과 관계없이 뉴턴 역학에서 일반적으로 통용된다. 따라서 상호작용과 관련된 개념들은 개념 모형에 의해 그 범위와 관계가 설정되지 않는다고

판단하여 개념 모형과 화살표로 연결하지 않았다.

분면 형성은 계의 운동 상태 변화를 기술하는 상태 분면, 대상에 작용하는 상호작용 간의 관계를 기술하는 상호작용 분면, 상호작용에 의한 대상의 상태변화를 인과적으로 설명하는 인과 분면 등을 통해 모형의 구조를 형성하는 과정이다. 상호작용 분면은 상호작용 관련 개념, 인과 분면은 동역학, 상태 분면은 운동학과 관련된 개념 세계 요소들을 통해 기술자들의 관계가 구체화됨으로써 형성된다.

수학적 조작은 문제 상황의 초기 조건들을 생성된 모형에 적용하여 문제 상황에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용, 특성과 관련된 해를 수학적으로 도출하는 과정이다. 문제에서 요구하는 변인이 무엇인가에 따라 수학적 조작에서 중심적인 역할을 하는 분면이 결정된다.

타당화는 모형의 내적 요인과 외적 기준으로 모형의 대응 여부를 판단하는 단계이다. 내적 요인은 문제 상황의 물리적인 계와 모형 구조의 동형성, 선택된 개념 모형의 적합성, 분면 간의 정합, 수학적 조작의 타당성에 관한 것이다. 외적 요인은 문제에서 요구하는 해의 정밀함, 해와 제시된 보기와의 일치 여부이며 선다형 문항에서는 주로 후자에 해당한다.

2.4. 동료교수와 소집단 상호작용

본 절에서는 동료교수에 대한 개괄적인 설명과 물리 해결에서의 효용성에 대해 논의하였다. 그리고 동료교수를 비롯한 과학 탐구활동에서 소집단 상호작용의 양상에 대한 선행 연구의 결과를 정리하였다. 이를 바탕으로 본 연구의 소집단 상호작용에 대한 접근 방식에 대해 기술하였다.

2.4.1. 동료교수

동료교수(Peer Instruction)는 동료와의 소집단 상호작용을 통해 학생들의 수업 참여와 개념 이해 수준을 높이하고자 한 물리 문제해결과 관련된 대표적인 수업 모형이다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001). 동기 수준이 높은 몇몇의 학생들만 참여하는 일반적인 강의와 달리 동료교수에서는 구조화된 질문을 통해 수업을 듣는 모든 학생들이 적극적으로 협업하며 활동에 관여하도록 한다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001). 동료교수는 1990년대 말부터 대학을 중심으로 물리학 뿐만이 아니라 정보과학, 논리학, 생리학, 화학, 의학 생물학, 수학분야에 널리 적용되었으며 전자 투표기(Clicker) 및 교실응답시스템(CRS: Classroom Reponse System)을 활용하여 교실 안에서 학습자와 교수자간의 즉각적인 피드백이 가능한 수업을 구현하였다(장혜원, 김중복, 2017). 10년 이상의 동료교수는 동료와의 협업을 통해 개인의 학습 성취를 향상시킬 수 있음을 입증한 획기적인 시도로 평가받고 있으며 광범위한 적용을 통해 그 효용성을 검증 받아 왔다(Lasry *et al.*, 2008).

동료교수를 적용한 수업 모듈은 다음과 같이 구성된다. (1)수업 전 읽기 과제(pre-class reading assignments), (2)소강의(mini-lectures), (3)개념검사문항(ConcepTests), (4)동료토론(peer discussion), (5)문제해결

(problem solving), (6)평가(examination)이다(장혜원, 2014). 수업 전 읽기 과제를 제외한 동료교수의 수업 모듈을 [표 2-14]에 제시하였다.

이러한 수업 모듈은 수업 시간 내에 반복될 수 있으며, 다양한 형태의 소집단 상호작용을 적용하여 변형할 수도 있다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001). 동료교수에서 교사는 학생들의 응답을 파악하기 위해 다양한 도구를 사용한다. 개발 초기에는 학생들이 손가락이나 종이카드로 자신의 응답을 알렸으며 최근에는 전자투표기(Clicker)나 웹기반 교실응답시스템인 Learning Catalytics가 개발되면서 학생들의 응답이 실시간으로 확인 가능해졌다(Schell & Mazur, 2013).

[표 2-14] 동료교수의 기본 모듈(장혜원, 2014)

1	2	3	4	5	6
소강의	개념질문	응답1	다른 응답을 한 학생들 간에 짝을 지어 토론	응답2	교사 피드백 설명

2.4.2. 물리 문제해결에서 동료교수의 효용성

동료교수와 관련된 대표적인 연구로 Crouch & Mazur(2001)를 들 수 있다. 이들은 하버드 대학교에서 10년간 동료교수를 적용한 결과 학생들의 Force Concept Inventory와 Mechanics Baseline Test 성취도가 큰 폭으로 상승하였으며, 전통적인 정량적 문제에서도 학생들의 성취가 높아진 것으로 보고하였다(Crouch & Mazur, 2001). 이들은 효과적인 동료교수의 구현 방안도 함께 제시하여 동료교수가 다양한 교과에 적용되는데 핵심적인 역할을 하였다.

Lasry *et al.*(2008)은 최상위 4년제 대학생과 2년제 대학생에게 동료교수를 적용하여 일반 물리학 강좌를 진행한 결과, 배경 지식이 더 많은

학생일수록 더 많은 학습이 일어남을 확인하였다(Lasry *et al.*, 2008). 그러나 배경 지식이 적은 학생들에게는 동료교수가 전통적인 강의식 수업보다 더욱 효과적인 것으로 나타났으며 학생들의 수업 이탈도 적었다(Lasry *et al.*, 2008).

Smith *et al.*(2009)은 동일한 개념에 대한 동형 문항을 쌍으로 제작하여 이전 문항에서의 동료교수가 다음 문항의 풀이에 미치는 영향을 분석하였다. 이들은 모둠원 중에서 정답을 아는 사람이 없을 때에도 동료 토론을 통해 학생들의 이해가 향상되었음을 관찰하고 동료교수가 단순한 정답의 전달이 아님을 주장하였다(Smith *et al.*, 2009).

앞의 선행 연구들이 주로 검사 결과나 성취도에 관한 것이었다면 Mason & Singh(2010)의 연구는 학생들의 절차적 지식 혹은 전략적 지식의 발달에 관한 것이다. Mason & Singh(2010)은 학생들을 연습 시간에 동료 성찰 모둠(Peer reflection group)에 참여하게 하고 문제해결 때 서로에게 전략을 배우게 한 결과를 분석하였다. 동료 성찰에 참여했던 학생들의 기말 고사 성적이 상승한 것은 물론, 다이어그램을 그리는 학생의 비율이 높아진 것으로 보고되었다.

국내에서는 과학영재 교육, 과학교사 연수, 예비 교사 교육 등에 동료교수가 적용된 연구 사례들이 2012년 이후 꾸준히 보고되고 있다. 류은희 외(2012)는 동료교수 수업에서 문항의 난이도에 따른 과학영재의 인지갈등의 특성과 일반 학생들의 인지갈등 정도를 비교 분석하였다. 빛의 직진 및 합성에 관한 동료교수에서 과학영재들은 문항의 난이도와 관계없이 동료토론 후 유의미하게 인지갈등이 감소한 것으로 나타났다. 또한 동료와의 토론 과정에서 과학영재들은 자신의 개념을 명료화하고 반성적 사고를 함으로써 인지갈등을 감소시켰다. 뿐만 아니라 동료 토론 후에 난이도가 높은 문항에 대한 불안이 유의미하게 감소한 것으로 보고되었다(류은희 외, 2012).

김종원 외(2012)는 동료교수에 관한 교사 연수를 통해 초중등 교사들의 과학 개념 변화와 동료교수에 대한 인식을 조사하였다. 개념문항에

대한 사전-사후 검사 결과, 연수에 참여한 교사들은 동료교수 후에 높은 수준의 개념 변화가 있었으며 동료교수를 수업에 활용하는 것에 대한 긍정적인 인식을 가지고 있음이 확인되었다(김종원 외, 2012).

장혜원, 김중복(2017)은 교양물리를 수강하는 예비교사들을 대상으로 동료교수를 실시한 후 동료교수에 대한 경험과 인식을 분석하였다. 연구 결과 예비교사들은 동료교수에서 사고중심과 소통기반 수업이 왜 중요한지를 인식하고 소통기반 수업이 다양한 생각의 가치를 이해하는데 기여할 것이라고 응답하였다(장혜원, 김중복, 2017).

이러한 국내 연구의 성과에도 불구하고 물리 문제해결이 학습에서 큰 비중을 차지하는 일반 고등학생들을 대상으로 한 동료교수 연구는 부족한 상황이다. 또한 대부분 연구가 개념 검사 문항에 대한 결과이므로 고등학생들이 흔히 접하는 정량적인 물리 문제해결에 동료교수가 어떤 영향을 미치는가에 대해서 실증적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

2.4.3. 소집단 상호작용의 양상

James & Willoughby(2011)은 동료교수에서 일어나는 학생들의 담화를 분석하여 학생들의 담화가 교수자가 생각하는 기준에 얼마나 부합되며 실제로 어떤 양상의 대화를 나누는지 분석하였다. James & Willoughby(2011)는 동료교수에서 모둠원 중 적어도 한 명은 다른 대안을 제시하고 모듬이 만족할만한 설명을 구성할 때까지 논의하는 경우를 표준 대화(standard conversations)로 규정하였다. 총 361개의 담화 중에서 136개만이 표준 대화였으며 225개의 비표준 대화는 [표 2-15]와 같이 분류되었다.

James & Willoughby(2011)의 연구 결과는 기존의 양적 연구들과 달리 동료 토론에서 학생들의 대화를 분석했다는 점에서 색다른 의미를 부여할 수 있다. 특히 학생들이 교사가 예상하지 못한 지식의 근원을 이용

하여 문제를 해결하거나 정답을 선택하는 과정에 비논리적인 요인이 작용하고 있음을 지적한 부분은 동료교수의 효용성 뿐만이 아니라 비판적인 관점에서의 접근이 필요함을 시사한다. 그러나 대화의 분석 단위가 다소 모호하고 표준 대화에서의 학생들의 상호작용을 명확하게 정의하지 않고 이를 세밀하게 분석하지 않은 점은 아쉬움으로 남는다.

[표 2-15] 동료교수에서 비표준 대화(James & Willoughby, 2011)

범주	세부 항목
예상치 못한 학생들의 생각	직접적인 내용 지식에 대한 예상치 못한 학생들의 생각
	근접한 내용 지식에 대한 예상치 못한 학생들의 생각
	기초적인 과학 내용 지식에 대한 예상치 못한 학생들의 생각
	지난 강의에서 배운 관계없는 내용을 연관시킴
학생들의 이해를 왜곡한 통계적인 피드백	관계없는 단서를 사용하여 응답
	대화에서 설명한 본인의 정답과 동료의 정답이 일치하지 않을 때 동료의 정답을 선호함
대화가 곤란한 경우	정답을 선택하는 과정에서 물리적인 근거를 제시하지 않음
	동료가 명백한 답을 제시하여 조기에 대화가 종료됨
	다른 학생들의 설명에 수동적으로 대응
	대화의 시작이 불가능

Wood *et al.*(2014)는 동료교수를 적용한 대학생들의 일반물리학 수업에서의 담화를 자원 모형(resource model)으로 분석하였다. 동료와의 토의 과정에서 활성화되는 자원은 명제적 지식과 절차적 지식에 관한 지식 요소(knowledge elements), 요소들을 적용하는 유형의 연결에 관한 지식 구조(knowledge structures), 지식 구조를 언제 활성화시킬 것인가에 관한 통제 구조(control structure)로 범주화된다(Wood *et al.*, 2014). Wood

et al.(2014)는 학생들의 담화를 분석하여 세 종류의 자원이 활성화되는 사례를 제시하고 동료교수에서의 토의가 지식의 파편이나 정답의 전달을 넘어 지식을 적용하는 방법과 이론에 관한 학생들의 인식에도 영향을 줄 수 있음을 주장하였다.

Wood *et al.*(2014)의 연구 결과는 동료교수 맥락에서 학생들의 소집단 상호작용이 지식의 교환에서부터 개념의 활용과 이론에 대한 이해에 관한 내용적인 측면의 발달을 체계적으로 분석했다는 점에서 의의가 있다. 또한 정답률만으로 분석할 수 없는 학생들의 인지적인 학습 과정에 관한 분석을 시도했다는 점에서 물리 문제해결에 관한 의미 있는 시사점을 제공한다. 그러나 세 모둠의 담화만을 분석하였으므로 Wood *et al.*(2014)의 주장은 동료교수의 효용성에 대한 일반적인 결론이라기보다는 소집단 상호작용을 활용한 교수-학습의 분석 범위를 확장시켰다는 것으로 제한된 의의를 부여할 수 있다.

Hogan *et al.*(1999)은 교사에 의해 안내된(teacher-guided) 소집단 논의 과정에서 학생들이 수행한 추론의 복잡성과 상호작용의 유형을 연관지어 분석하였다. Hogan *et al.*(1999)은 상호작용의 유형을 구성원들의 역할과 참여방식에 따라 일방적 상호작용, 쌍방적 상호작용, 정교화 상호작용의 세 가지로 나뉘었으며, 유형별 정의는 [표 2-16]에서 제시하였다. 교사에 의해 안내된 토의에서 일방적 상호작용은 8%, 쌍방적 상호작용 54%, 정교화 상호작용 34%, 지식구성과 무관한 상호작용이 4%의 비율로 나타났다(Hogan *et al.*, 1999). 동료 토의에서는 일방적 상호작용이 19%, 쌍방적 상호작용 23% 정교화 상호작용은 48%, 지식구성과 무관한 상호작용이 10%로 나타나 교사가 개입했을 때 일방적 상호작용의 비율은 감소하고 쌍방적 상호작용의 비율은 높아지는 것으로 나타났으며, 정교화 상호작용의 경우는 오히려 학생들만 토의할 때 증가하였다(Hogan *et al.*, 1999).

Hogan *et al.*(1999)의 소집단 상호작용에서 학생들의 역할과 발언에 따라 상호작용의 양상이 어떻게 달라지는지를 명확하게 보여주는 사례이

므로 본 연구의 소집단 상호작용의 대략적인 양상을 기술하는데 있어 참고할만한 요소가 있다고 판단된다.

[표 2-16] 담화 유형 분류틀(Hogan *et al*, 1999)

유형	도식	설명
일방적 상호작용 (Consensual)		한 사람이 인지적(conceptual), 지각적(perceptual), 연계적(connecting), 전략적(strategic) 발언 등 의미 있는 발언을 하고 다른 사람들은 단순한 긍정이나 중립적인 반응을 보이는 것이다.
쌍방적 상호작용 (Responsive)		적어도 두 사람이 각각 의미 있는 질문과 반응을 통해 토의에 참여하는 경우이다. 질문하는 사람과 대답하는 사람의 역할은 다르나 토의에 동등하게 기여한다.
정교화 상호작용 (Elaborative)		모든 참여자가 다양한 방식으로 토의에서 중요한 역할을 하는 경우이다. 일순의 호응(responsive)과의 차이는 여러 번에 걸쳐서 대화가 오고가며, 참여자가 다양한 방식으로 기여한다는 점이다. 즉, 공동 구성을 위한 추가(co-constructive additions), 정정(corrections), 변증법적인 교환(dialectical exchange) 등을 통하여 기여할 수 있다.

이신영 외(2012)는 비록 혈액의 순환을 대상으로 한 연구이지만 소집단 모델링 수업에서 모두의 상호작용과 모형의 발달을 연구했다는 점에서 논의할만한 가치가 있다. 소집단 상호작용에 따른 심장 내 혈액 흐름에 대한 모델 발달 유형을 분석한 결과 소집단 상호작용은 학생들이 공동 모델을 구성하는 데에 중요한 요인이며, 모형의 비판적 검토, 모형의 제시자, 리더의 유형이 상호작용에 영향을 미친 것으로 보고되었다(이신

영 외, 2012). 모형의 발달 유형을 정체형, 첨가형, 정교형으로 분류하였다. [표 2-17]에서 이신영 외(2012)의 연구에서 보고한 소집단 모형 발달 유형과 상호작용 특성을 제시하였다

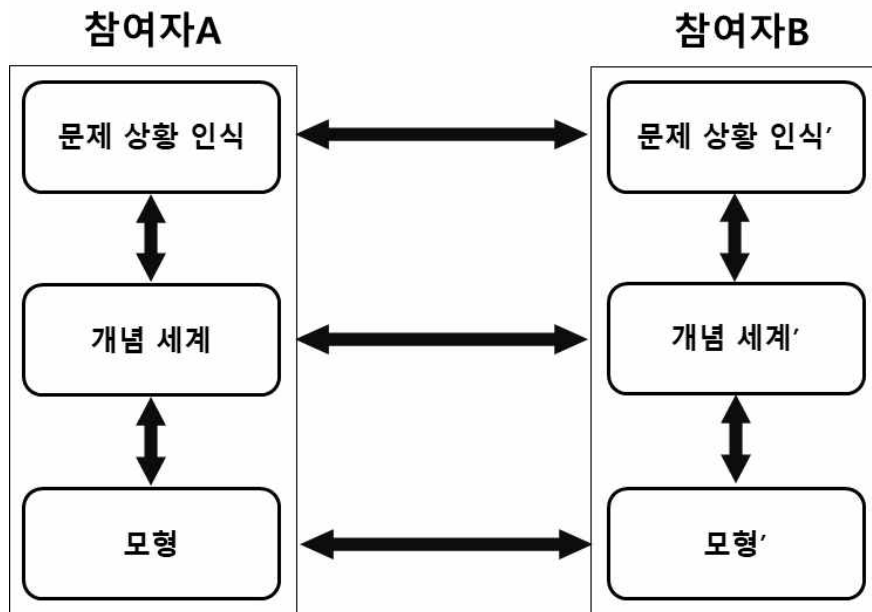
[표 2-17] 소집단 모형발달 유형과 상호작용 특성(이신영 외, 2012)

소집단 모형발달 유형		상호작용 특성	비판적 검토	모형 제시자	리더 유형
정체형					
한 학생의 모형	→	소집단 모형	나타나지 않음	리더만 참여	배타적
첨가형					
한 학생의 모형	↘	소집단 모형	다른 소집단 구성원에 의해 나타남	리더 외의 학생들도 참여	선택적
다른 사람의 모형	→ 단순한 합				
정교형					
한 학생의 모형	↘	소집단 모형	모형 제시자나 다른 소집단 구성원에 의해 나타남		선택적 혹은 포용적
다른 학생의 모형	→ 새로운 융합				

이신영 외(2012)의 연구는 학생들이 개별적으로 구성한 모형을 기반으로 집단의 모형을 구성하는 과정을 분석했다는 점에서 본 연구의 맥락과 유사하다. 특히, 모듈원의 비판적 검토와 모형 제시자의 존재 등은 물리 문제해결에 관한 소집단 상호작용에서도 중요한 요인으로 작용할 개연성이 크다. 단, 학생들의 개별적인 모형을 평가하지 않고 수평적으로 분류한 점과 소집단 모형이 개인에게 적절히 내면화되었는지에 대한 분석이 이뤄지지 않은 점은 비판의 소지가 있다.

지금부터는 모형구성 요소와 소집단 상호작용의 선행 연구의 결과에 적용하여 본 연구에서의 소집단 상호작용에 논하고자 한다. 이신영 외(2012)에서는 소집단 상호작용을 통한 모형의 발달 측면을 강조하였으나 Wood *et al.*(2014)의 결과를 보면 물리 문제해결에 관한 동료와의 토론

에서 학생들은 모형이나 모형의 해에 대해서만 논의하지 않음을 알 수 있다. 즉, 학생들은 문제해결에 관한 각자의 모형을 비교하거나 수용하는 과정에서 모형을 구성하는 지식 요소나 개념 모형과 같이 개념 세계에 해당되는 영역과 문제에 대한 이해 등에 관해 논의한다(Wood *et al.*, 2014, 박윤배, 김미영, 2006). 따라서 본 연구에서 모형구성의 소집단 상호작용을 모형구성의 세 가지 요소, 즉 문제 상황, 개념 세계 및 모형에 관한 논의로 세분화하였다[그림 2-18]. [그림 2-18]에서 수평방향 화살표는 모형구성 요소들의 상호작용을 의미하며 큰 사각형 내부에서 모형구성 요소들을 연결하는 수직방향 화살표는 모형구성 요소들의 내적 일관성을 의미한다.



[그림 2-18] 모형구성 요소의 상호작용

먼저 문제 상황 인식의 상호작용은 참여자들이 주어진 정보를 바탕으로 문제 상황을 어떻게 재구성했는가를 비교하는 것이다. 문제 상황 인식의 논의는 제시문의 구문과 도식의 표상에 대한 이해뿐만이 아니라 계의 설정과 기술자 식별에 관한 내용을 포함한다.

개념 세계 간의 상호작용은 개념 세계를 구성하는 이론과 개념 모형,

개념에 대한 논의로 이해할 수 있다. 학생들의 모형과 문제 상황 인식에 대한 논의는 활동지를 통해 외부에서 관찰 가능한 영역이지만 모형구성 과정에서 활용된 개념 세계 요소들의 특성은 자발적으로 외부에 드러나지 않을 수 있다(Lopes & Costa, 2007). 그러나 문제해결에 관한 담화에서 학생들은 자신이 어떠한 인지적 자원을 활용했는가를 언급하면서 개념 세계의 일부를 노출하며(Wood *et al.*, 2014) 이를 통해 동료교수에서 개념 세계의 상호작용을 관찰할 수 있다.

모형에 대한 논의는 참여자들이 각자 구성한 모형을 동료들과 공유하는 과정에서 모형의 각 분면과 수학적 조작에 의한 해를 비교/평가하는 것을 의미한다. 이는 모형구성에 관한 소집단 상호작용의 전체적인 방향을 결정짓는 핵심적인 영역으로 모형 구조의 공통점과 차이를 식별하여 모형의 타당성을 검증하고 모형의 수용, 수정, 융합 등을 통해 모형의 공동 구성이 일어난다(이신영 외, 2012).

3. 연구 방법

3.1. 연구 대상

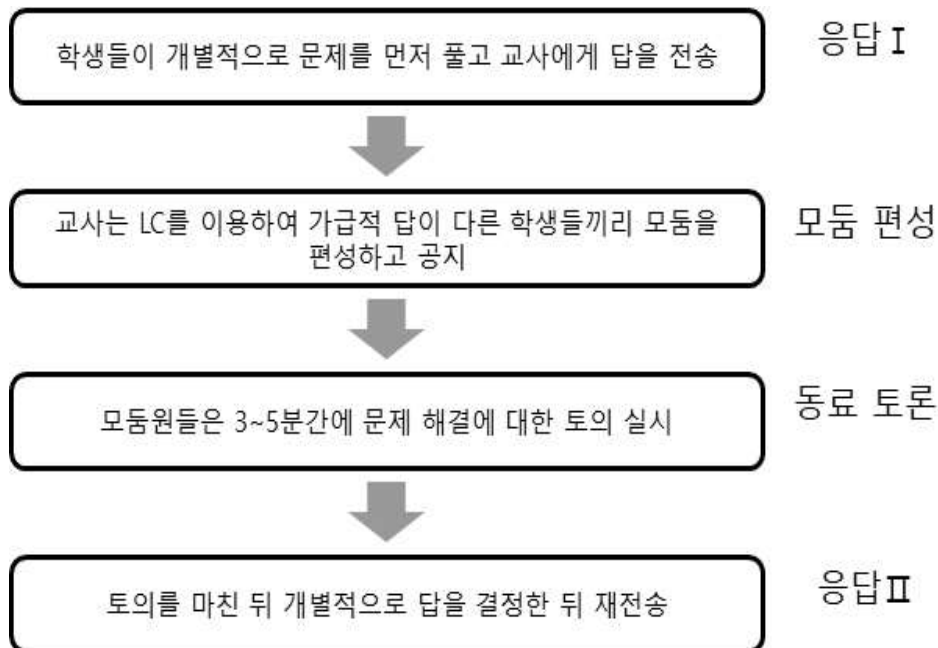
본 연구는 서울에 소재한 일반계 고등학교 2학년 남학생들을 대상으로 진행되었다. 연구자는 학교장의 동의를 얻어 연구 목적으로 특강이 개설됨을 공지하고 연구 참여자를 모집하였다. 총 32명의 참여자들이 모집공고를 보고 자원했으며 물리 성적이 우수한 학생들이 다수를 차지하였다. 또한 연구 참여자들은 자연계열 학생들로 직전 1학기에 뉴턴의 운동 법칙에 대한 학습한 경험이 있었다. 수업은 2017년 9월에 진행되었으며 90분씩 2차시를 진행하였다. 2차시 수업 중에서 1차시에서는 18번 학생이, 2차시에서는 3번 학생이 개인 사정으로 불참하였다.

3.2. 수업의 구성

3.2.1 수업의 흐름

동료교수를 적용한 수업을 진행하기 위해 본 연구에서는 최근에 개발된 Learning Catalytics를 활용하였다. Learning Catalytics는 Mazur가 이끄는 하버드 대학의 물리교육 연구진에서 일반 물리를 수강하는 학생들의 수업참여를 높이고 상호작용을 촉진을 목적으로 개발한 것으로 자신들이 설계한 동료교수를 구현하기 위해 설계된 교실응답시스템(Classroom Response Systems)의 일종이다(Schell & Mazur, 2013). Learning Catalytics는 기존의 Clicker가 별도의 단말기를 필요로 했던 것과 달리 학생들은 자신의 스마트폰과 태블릿 PC의 웹 브라우저를 통해 Learning Catalytics에 접속할 수 있다.

Learning Catalytics를 활용한 동료교수 활동에서 참여자들은 같은 문항을 2번에 걸쳐 풀게 되는데, 첫 번째 시도에서는 동료 참여자와의 어떠한 상호작용도 없이 개별적으로 선다형 문제를 푼 뒤에 Learning Catalytics를 통해 자신의 답을 교사에게 전송한다(Schell & Mazur, 2013). 전송이 완료되면 교사는 Learning Catalytics의 모둠 편성 기능을 활용하여 가급적 답이 다른 참여자들끼리 한 모둠이 되도록 편성한 뒤 모둠 결과를 공지한다(Schell & Mazur, 2013). 참여자들은 모둠별로 모여 문항에 대한 각자의 풀이와 답에 대해 토론한 후, 자신의 원래 자리로 돌아와 개별적으로 교사에게 답을 전송하게 된다. 본 연구에서 원칙적으로 4명이 한 모둠원으로 구성되며, 학생들이 제출한 답에 따라 매 문항 모듬의 편성이 변하게 된다. 수업은 연구자와 정규 물리수업을 담당하고 있는 교사가 함께 진행하였으며, 전체적인 수업의 흐름은 [그림 3-1]에 제시하였다.



[그림 3-1] 수업의 흐름

3.2.2. 문항의 제작

문항을 제작하는데 있어 가장 고려한 것은 학생들이 물리 I 교과 내에서 흔히 접할 수 있는 상황이어야 한다는 점이다. 이를 위해 물리 I 정규 수업의 형성 평가 등에서 많이 활용되는 문제 상황을 적용하고자 하였다. 정답률이 중간 수준이거나 높은 문항의 경우 학생들이 답을 단순히 받아들이는 경우가 많으며, 정답률이 낮은 경우 학생들의 협업이 촉진된다는 선행연구(Smith *et al.*, 2009; Jang *et al.*, 2017)를 참고하여 중간 혹은 다소 높은 난이도로 설정하고자 하였다. 마지막으로 학생들의 모형 구조를 세부적으로 분석하기 위해서 모형의 각 분면을 모두 구성해야만 문제해결이 가능한 형태로 문항을 개발하고자 하였다. 즉, 모형의 분면이 명확하게 구별되고 수학적 모형구성이 가능한 문제 상황을 제시하기 위해 물리 I 교육과정의 핵심 아이디어 중에서 뉴턴의 운동법칙을

선택하였다. 또한 정답이 다른 학생들끼리 모두 편성을 용이하게 하기 위해 모두 5지 선다형으로 제작되었다. 대학수학능력시험과 전국연합모의고사에서 다수의 출제 경험이 있는 경력이 15년 이상의 물리교사 1인과 물리교육전문가 1인과의 협업을 통해 총 12개의 문항을 개발하였다.

대부분의 문항은 연구자가 자체적으로 개발하였으나 1번과 9번은 Force Concept Inventory(Hestenes *et al.*, 1992)의 문제 상황을 차용하였다. 개발된 문항은 물리교육 전문가와 중등 물리 교사 및 대학원생들로 구성된 집단 세미나를 통해 타당도를 검토 받았다. 각 문항의 문제 상황과 평가 요소를 [표 3-1]에 제시하였다.

[표 3-1] 문제 상황과 평가 요소

번호	문제 상황	평가 요소
1	등가속도 운동 (자유낙하)	○ 자유 낙하하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다.
2	등가속도 운동 (자유낙하), 등속직선 운동	○ 자유 낙하하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다. ○ 등속으로 낙하하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다. ○ 다른 유형의 운동을 하는 두 물체의 운동을 동일한 좌표계에서 기술할 수 있다.
3	등속직선 운동, 등가속도 운동	○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다. ○ 등가속도 운동하는 물체의 이동거리를 속도의 함수로 표현할 수 있다. ○ 등속 직선 운동하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다.
4	등가속도 운동	○ 속도-시간 그래프의 기울기를 이용하여 가속도를 계산할 수 있다. ○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다. ○ 속도-시간 그래프의 기울기를 이용하여 가속도를 계

		<p>산할 수 있다.</p> <p>○ 등가속도 운동하는 물체의 이동거리를 속도의 함수로 표현할 수 있다.</p>
5	등가속도 운동	<p>○ 등속 직선 운동하는 물체는 힘이 작용하지 않는 것이 아니라 알짜힘의 크기가 0임을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 운동하고 있는 물체에는 일정한 크기의 마찰력이 작용하고 있음을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다.</p> <p>○ 등가속도 운동하는 물체의 속도를 시간의 함수로 표현할 수 있다.</p>
6	등가속도 운동	<p>○ 등속 직선 운동하는 물체는 힘이 작용하지 않는 것이 아니라 알짜힘의 크기가 0임을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 운동하고 있는 물체에는 일정한 크기의 마찰력이 작용하고 있음을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 힘의 합성을 이용하여 물체에 작용하는 알짜힘의 크기를 계산할 수 있다.</p> <p>○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다.</p> <p>○ 등가속도 운동하는 물체의 이동거리를 속도의 함수로 표현할 수 있다.</p>
7	등가속도 운동	<p>○ 팽팽한 실로 연결된 물체에 장력이 작용하고 있음을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 물체에 작용하는 힘의 종류와 방향을 식별할 수 있다.</p> <p>○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 가속도로 운동하고 있는 물체의 알짜힘의 크기를 구할 수 있다.</p> <p>○ 두 물체의 운동방정식을 연립하여 물체에 작용하는 힘의 크기를 구할 수 있다.</p>
8	등가속도 운동	<p>○ 팽팽한 실로 연결된 물체에 장력이 작용하고 있음을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 물체에 작용하는 힘의 종류와 방향을 식별할 수 있다.</p> <p>○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 가속도로 운동하고 있는 물체의 알짜힘의 크기를 구할 수 있다.</p> <p>○ 두 물체의 운동방정식을 연립하여 물체에 작용하는 힘의 크기를 구할 수 있다.</p> <p>○ 등가속도 운동하는 물체의 속도를 시간의 함수로 표</p>

		현할 수 있다.
9	등가속도 운동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 가속도로 운동하고 있는 물체의 알짜힘의 크기를 구할 수 있다. ○ 운동 3법칙을 적용하여 작용과 반작용 관계에 있는 힘을 구할 수 있다.
10	등가속도 운동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 운동 3법칙을 적용하여 작용과 반작용 관계에 있는 힘을 구할 수 있다. ○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다. ○ 등가속도 운동하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다. ○ 서로 다른 운동을 하는 물체의 운동을 동일한 좌표계에서 기술할 수 있다.
11	가속도 운동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 힘-시간 그래프에서 면적을 계산하여 물체에 작용한 충격량을 구할 수 있다. ○ 물체에 작용한 충격량의 크기는 운동량의 변화량과 같다는 것을 적용하여 물체의 속도 변화량을 구할 수 있다.
12	가속도 운동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 힘-시간 그래프에서 면적을 계산하여 물체에 작용한 충격량을 구할 수 있다. ○ 물체에 작용한 충격량의 크기는 운동량의 변화량과 같다는 것을 적용하여 물체의 속도 변화량을 구할 수 있다. ○ 등가속도 운동하는 물체의 속도를 시간의 함수로 표현할 수 있다.

이번에는 [그림 2-6]에서 제시한 뉴턴 역학의 지식 구조를 이용하여 각 문항이 뉴턴 역학의 어떤 지식 구조를 반영하고 있는지를 [표 3-2]에 제시하였다.

[표 3-2] 뉴턴 역학의 지식 구조에 따른 문항 분석(*는 명시적으로 제시되지 않는 상호작용임)

문항	일반적인 규칙	동역학	운동학		상호작용	
			운동기술자	기본 모형	상호작용 기술자	상호작용 기술자간의 관계
1	x	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등가속도 운동	중력	x
2	대상들의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다.	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등가속도 운동 등속직선 운동	중력, 공기와의 마찰력*	$F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
3	x	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등속직선 운동 등가속도 운동	지면과의 마찰력	x
4	x	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등가속도 운동	지면과의 마찰력	x
5	x	$F=ma$	속도, 가속도	등속직선 운동 등가속도 운동	외력, 지면과의 운동마찰력*	$F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
6	x	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등속직선 운동 등가속도 운동	외력, 지면과의 운동마찰력*	$F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
7	대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미	$F=ma$	가속도	등가속도 운동	중력, 대상 간 상호작용(장력)*	$F_{12} = -F_{21},$ $F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$

		친다.					
8		대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다.	$F = ma$	속도, 가속도	등가속도 운동	중력, 마찰력, 대상간 상호작용(장력)*	$F_{12} = -F_{21},$ $F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
9		대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다.	$F = ma$	가속도	등가속도 운동	대상간 상호작용, 자동차의 구동력*	$F_{12} = -F_{21},$ $F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
10		대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다. 대상들의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다.	$F = ma$	변위, 속도, 가속도	등가속도 운동	대상간 상호작용(장력)	$F_{12} = -F_{21}$
11	x		$F\Delta t = \Delta mv$	속도, 운동량	충격에 의한 운동	짧은 시간 동안 가해지는 충격량	x
12	x		$F\Delta t = \Delta mv$ $F = ma$	속도, 가속도, 운동량	등가속도 운동 충격에 의한 운동	제동력, 중력	x

본 연구에서 개발한 문항으로부터 확인하고자 하는 계의 구성에 관한 일반 규칙은 다음과 같다.

- 1) 대상들의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다.
- 2) 대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다.

본 연구에서는 뉴턴 역학의 일반적인 규칙 중에서 계의 운동에 관한 부분을 반영하여 문항을 제작하였다. 계의 구성과 특성에 관한 부분을 반영하지 않은 이유는 고등학교 물리 문제는 실제 자연현상을 부분적으로 묘사하는 물리적인 계(physical system)의 형태로 제시되기 때문이다. 계의 구성과 특성은 실제 세계 혹은 자연적인 계(natural system)를 물리적인 계로 개념화하고 단순화하는 과정(Hestenes, 1997; Lopes & Costa, 2007; Niss, 2012)에서 요구된다. 순수하게 자연적인 계에 관한 문제 상황은 고등학교 현장에서 학생들이 흔히 접하는 유형이 아니므로 본 연구에서는 계의 구성과 특성에 관한 부분을 문항 제작에 반영하기 어려웠다.

개념 모형으로는 등속직선 운동, 등가속도 직선 운동, 충격에 의한 운동을 선정하였으며 동역학에서는 물리 I 교육과정을 고려하여 뉴턴의 운동2법칙을 개념 모형에 따라 $F=ma$ 와 $F\Delta t = \Delta mv$ 로 구별하였다. 운동학 측면에서는 변위, 위치, 속도, 가속도, 운동량을 상태 기술자로, 상호작용 측면에서는 중학교 과학과 물리 I 교육과정에서 제시한 중력, 마찰력, 충격력을 상호작용 기술자로 제시하였다. 일부 문항에서 대상 간의 상호작용을 표현하기 위하여 장력을 포함시켰으나 이를 명시적으로 언급하지는 않았다. 상호작용 기술자의 관계는 교육과정에서 운동3법칙으로 제시하고 있는 $F_{12} = -F_{21}$ 와 중학교에서 다루는 힘의 합성($F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$)으로 한정하여 문항을 제작하였다.

1번부터 6번까지는 1차시 수업에서 활용되었으며 7번부터 12번은 2차시 수업에서 활용되었다.

3.2.3. 문항 정답률

응답 I 과 응답 II에서의 학생들의 정답률을 [표 3-3]에 제시하였다. 검사 문항에 대한 채점은 Learning Catalytics에 전송된 학생들의 응답을 대상으로 실시되었다. 학생들은 교사가 마감할 때까지 자유롭게 선택한 답을 변경할 수 있었다.

[표 3-3] 문항 정답률

문항	정답률(%)	
	응답 I	응답 II
1	67.7	90.3
2	64.5	93.5
3	71.0	100.0
4	54.8	100.0
5	80.6	96.8
6	35.5	96.8
7	32.3	61.3
8	64.5	100.0
9	32.3	45.2
10	22.6	58.1
11	74.2	96.8
12	45.2	77.4
전체	53.8	84.7

Cangelosi(1990)의 기준으로 각 문항에 대한 난이도를 해석을 할 수 있다. Cangelosi(1990)에 따르면 난이도에 대한 해석은 정답률이 25% 미만이면 ‘어려운 문항’으로, 25%이상 75% 미만이면 ‘적절한 문항’으로, 75% 이상이면 ‘쉬운 문항’으로 판단한다. 응답 I 의 정답률을 위 기준에 적용해보면 쉬운 문항인 5번과 어려운 문항인 10번을 제외하고는 모두 적절한 문항으로 분류할 수 있다.

학생들은 대체적으로 동료와의 토론을 거친 뒤에 응답Ⅱ에서 높은 비율로 정답을 식별하고 선택하는 것으로 나타났다. 그러나 7번, 9번, 10번은 응답Ⅱ에서도 70% 이하의 정답률을 보이고 있다. 세 문항의 저조한 정답률은 동료와의 토의에도 불구하고 정답을 찾지 못할 만큼 난이도가 높았거나 오답을 정답으로 오인할만한 요인이 있었던 것으로 생각된다.

3.2.4 모듈의 정답 분포 변화

본 연구에서는 응답 I 에서 학생들이 선택한 답을 기초로 가급적 답이 다른 학생들끼리 모듈을 편성을 하고자 하였다. 따라서 매 문항마다 학생들은 다른 모듈에서 동료교수를 진행하였다. 동료교수를 거치며 각 모듈별로 정답을 선택한 모듈원의 수가 어떻게 변했는지를 [표 3-4]에서 제시하였다.

[표 3-4] 모듬의 정답 분포 변화

응답 I	응답 II	※모듬(N=95)
All correct answers	All correct answers	16, 17, 22, 26, 27, 31, 42, 43, 48, 52, 54, 56, 57, 58, 84, 87, 88, 113, 115, 116, 117, 123
	3 correct answers	
	2 correct answers	
	1 correct answer	
	No correct answer	
3 correct answers	All correct answers	12, 35, 51, 86, 98, 118, 128
	3 correct answers	
	2 correct answers	
	1 correct answer	
	No correct answer	
2 correct answers	All correct answers	11, 13, 14, 21, 24, 25, 36, 37, 38, 64, 67, 68, 77, 78, 83, 112, 127
	3 correct answers	15
	2 correct answers	
	1 correct answer	18, 53
	No correct answer	71
1 correct answer	All correct answers	32, 33, 34, 41, 44, 45, 46, 47, 62, 63, 65, 66, 72, 73, 74, 81, 82, 85, 91, 97, 101, 106, 111, 124, 126
	3 correct answers	55, 61, 104, 105, 108, 125
	2 correct answers	23, 94, 114, 121
	1 correct answer	93, 103, 122
	No correct answer	76, 92, 95, 96, 107
No correct answer	All correct answers	
	3 correct answers	
	2 correct answers	
	1 correct answer	
	No correct answer	75, 102

※ 모듬의 숫자는 앞자리는 문항 번호, 뒷자리는 모듬 번호의 조합을 의미한다. 예를 들어 27은 2번 문항의 7조를 의미한다.

※ 원칙적으로 문항별 8개 모듬이 구성되어야 하나 2번 문항만 예외적으로 7개 모듬으로 구성되었다.

총 95개의 모듈 중에서 응답 I 에서 모든 모듈원이 정답을 선택한 모듈은 19개이며 응답 II 에서 모든 모듈원이 정답을 선택한 모듈은 71개이다. 응답 I 에서 정답을 선택한 모듈원이 1명인 모듈은 응답 II 에서 한 개의 답으로 합의하기보다는 개별적으로 답을 판단하고 선택하는 경우가 상대적으로 높은 빈도로 나타났다.

3.3 자료 수집

본 연구에서는 학생들이 동료교수 활동에서 동료들과 나눈 담화와 작성한 활동지를 분석 대상으로 선정하였다. 학생들이 모둠별로 모여서 토론을 하는 장면은 캠코더를 이용하여 녹화되었으며 대화 내용은 모두 전사되었다. 문항에 대한 학생들의 응답은 교실응답시스템에 의해 자동으로 수집되었다.

연구자는 수업에서 학생들의 활동을 관찰한 내용을 정리하여 관찰 기록을 작성했다. 작성된 관찰 기록은 학생 활동지, 전사 자료 등과 더불어 학생들의 동료교수 활동을 해석하기 위한 기초 자료로 활용되었다. 이와 같이 본 연구에서는 질적 연구로서의 타당성을 확보하기 위해 단 하나의 출처로부터 자료를 수집하기보다는 다양한 방법으로 자료를 수집하는 삼각검증법을 사용하였다(곽영순, 2003; 채동현, 2003).

3.4 자료 분석

3.4.1. 모형구성의 분석틀

연구자는 학생들이 작성한 활동지와 전사 자료를 바탕으로 학생들의 문제해결과정과 결과를 반복적으로 분석하였다. 연구자가 학생들의 모형구성을 분석한 결과와 모형구성에 관한 선행 연구를 비교한 뒤 Hestenes(1987)과 Lopes & Costa(2007), Niss(2012)의 관점을 토대로 본 연구의 모형구성의 분석틀을 제안하였다[표 2-13].

참여자들의 모형구성 유형은 학생들이 작성한 활동지를 토대로 분석하였으며 활동지만으로 식별이 어려운 경우 전사 자료를 참고하였다.

3.4.2. 소집단 상호작용 양상 분류

연구자는 참여자들의 소집단 상호작용 양상을 대응된 모형을 구성한 모둠원의 수, 모둠원들의 역할, 모형의 동질성, 모형의 변화 측면에서 분류하고자 하였다. 모형의 대응이란 참여자 자신이 구성한 모형이 문제 상황에 대해 타당한 설명력을 지녔다고 판단한 경우를 의미한다.

먼저 모둠 내에 대응된 모형을 구성한 모둠원 수는 참여자들이 작성한 활동지와 전사 자료를 통해 분석이 이뤄졌다. 참여자들은 다양한 방식으로 자신이 구성한 모형의 타당성을 검증하는데, 명시적으로 드러난 타당화의 기준은 모형의 해가 문제의 보기와 일치하느냐이다. 참여자들은 자신의 해가 보기 중의 하나와 일치하면 모형이 타당하다고 인식하는 경우가 많았다. 반면 해가 보기 중의 하나와 일치하지 않거나 모형구성 과정에서 임의적인 요소가 개입된 경우 모형이 대응되지 않았다고 판단하는 것으로 관찰되었다. 이는 참여자들이 응답 I에서 제출한 답안과 활동지, 전사 자료를 통해 모둠 내에 모형의 대응에 대한 참여자들의 판단을 유

[표 2-13] 모형구성 분석틀의 세부 단계

단계	설명
기술자 식별	문제 상황의 물리적 실체들을 대상과 동인으로 구분하여 모형의 계를 구성하고 대상의 상태와 외부와의 상호작용을 기술자(descriptor)로서 인식
	1) 상태 기술자 대상의 행동을 특징짓고 다른 대상이나 동인과의 상호작용을 통해서 변할 수 있는 특성을 표상. 2) 상호작용 기술자 두 개 이상의 물리적 물체들이 서로에게 작용하는 상호작용을 표상.
개념 모형 선택	계의 상태를 기술하고 설명하기 위해 학습자가 사전에 갖고 있던 개념 모형들의 적합성을 판별하고 선택
분면 형성	계의 상태와 상호작용 기술자들을 적절한 개념 세계의 요소들과 연관 지어 모형이 문제 상황의 특정 유형을 대리하는 구조를 구성하는 과정
	1) 상태 분면 대상의 초기 상태나 변화 상태에 대한 규칙성을 기술하거나 정의 2) 상호작용 분면 대상과 대상, 대상과 동인과의 상호작용을 정의 3) 인과 분면 대상이 다른 대상이나 동인과의 상호작용에 의해 상태가 어떻게 변해 가는 지를 인과 관계에 의해 설명
수학적 조작	초기 조건들을 적용하여 문제 상황에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용, 특성과 관련된 해를 수학적으로 도출 모형의 내적 요인과 외적 기준으로 모형의 대응 여부를 판단하는 단계.
타당화	1) 내적 요인 문제 상황과 모형 구조의 동형성, 선택된 개념 모형의 적합성, 분면간의 정합, 수학적 일관성 2) 외적 요인 문제에서 요구하는 해의 정밀함. 해와 제시된 보기와의 일치

추하였다. 또한 모형의 대응 여부는 A4, A3, A2 유형만을 대상으로 확인하였는데 이는 A1, ID, IG 유형은 모든 분면을 구성하여 구조적으로 완성된 모형을 구성하지 못했으므로 일괄적으로 대응된 모형을 구성하지 못한 것으로 판단하였다.

모둠원들의 역할은 Hogan *et al.*(1999)이 제시한 담화 유형 분석틀을 참고하였다. 본 연구에서는 일방적 상호작용과 쌍방적 상호작용에서 설명을 주도하는 참여자를 교수자, 수동적으로 반응하거나 질문을 하는 참여자를 피교수자로 분류하였다. 그 밖에 정교화 상호작용에 참여하는 모둠원은 세부적인 분류를 하지 않고 대등한 관계에서 상호작용하는 것으로 인식하였다.

참여자들의 모형 변화는 이신영 외(2012)의 모형 발달 유형을 참고하여 개별 모형의 변화 양상을 모형의 수용, 고수, 수정, 새로운 모형 생성으로 구분하였다. [표 3-5]에 소집단 상호작용 양상 범주화의 기준을 정리하였다.

[표 3-5] 소집단 상호작용 양상 범주화 기준

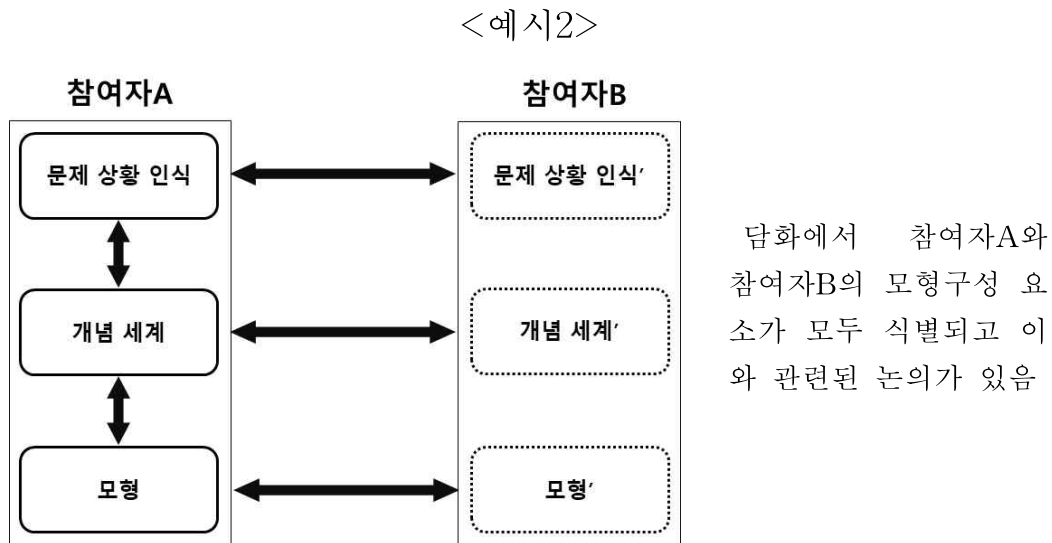
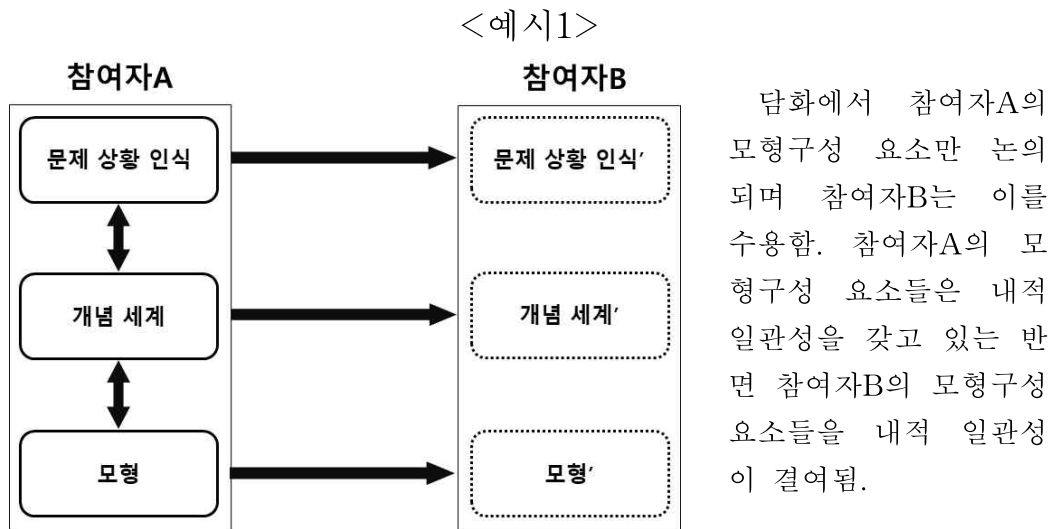
기준	분류	분석 자료
대응된 모형을 구성한 모둠원 수	2인 이상 1인 한 명도 없음	제출한 답안, 활동지, 전사 자료
선택된 개념 모형의 종류	등속직선 운동 모형 등가속도 운동 모형 충격에 의한 운동 모형 일-에너지 모형 역학적 에너지 보존 모형	활동지, 전사 자료
역할	교수자 피교수자 대등한 관계	전사 자료, 관찰 일지
모형의 변화 양상	수용 고수 수정 생성	전사 자료, 활동지

3.4.3. 소집단 상호작용의 모형구성에 미치는 영향

소집단 상호작용이 참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 분석하기 위해 소집단 상호작용을 [그림 2-18]에서 제시한 문제 상황 인식, 개념 세계, 모형의 세 가지 요소의 상호작용으로 세분화하였다.

문제 상황 인식은 문항에서 제시문의 구문적인 이해와 도식의 표상에 관한 것뿐만이 아니라 계의 설정과 기술자를 어떻게 인식했는가를 포함한다. 개념 세계는 개념 세계를 구성하는 이론과 개념 모형, 개념에 대한 진술로 파악하였다. 모형은 모형의 각 분면과 수학적 조작, 도출된 해에 대한 언급으로 분석하였다.

[그림 3-2]에서 모형구성 요소들의 상호작용 예시를 도식화하여 제시하였다. 과학적으로 타당한 모형구성 요소는 실선으로, 타당하지 않은 요소는 점선으로 표현하였다. 또한 모형구성 요소를 수평방향으로 연결하는 화살표가 일방향인 것은 담화에서 한 참여자의 요소만 명확하게 드러나고 다른 참여자들은 이를 수용하는 것을 의미한다(예시1). 반면 소집단 상호작용에 참여하는 모든 참여자들의 모형구성 요소가 드러난 경우는 양방향 화살표로 표현하였다(예시2). 참여자A는 모형구성 요소를 연결하는 수직 화살표가 있는 반면, 참여자B의 모형구성 요소는 화살표로 연결되지 않는다. 이는 참여자A의 모형구성은 세 요소가 일관성 있게 연결되고 있음을 의미하며 참여자B의 모형구성은 요소 간에 일관성이 없고 모순이 존재함을 나타낸다.



[그림 3-2] 모형구성 요소의 상호작용 예시

세 모형구성 요소 간의 상호작용이 참여자들의 모형구성 변화에 어떻게 영향을 미치는지 분석함으로써 소집단 상호작용이 참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 탐색하였다.

연구자가 해석한 결과는 물리교육 전문가 3인의 반복적인 검토를 거쳐 물리교육 전문가와 중등 물리 교사 및 대학원생들로 구성된 집단 세미나를 3회 이상 실시하여 연구 결과 해석 및 논의의 타당성을 점검하였다.

4. 결과 및 논의

4.1 모형구성의 유형과 어려움

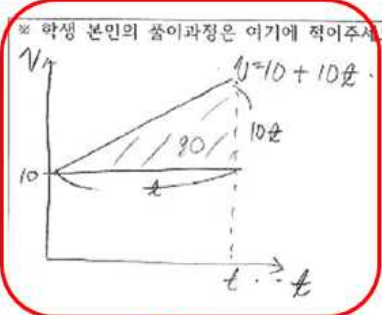
이 절에서는 뉴턴 역학 문제에 대한 참여자들의 모형구성을 유형화하고 각 문항별로 모형구성 유형의 분포를 기술하였다. 그리고 각 문항별로 동일한 유형의 모형구성을 한 참여자들의 일관된 특징을 식별하여 모형구성에서의 어려움을 분석하였다.

4.1.1 모형구성 유형

[표 2-13]에서 제시한 본 연구의 모형구성 분석틀을 바탕으로 참여자들이 응답 I 에서 개별적으로 작성한 활동지와 담화 자료를 분석하여 참여자들의 모형구성을 6가지 유형으로 범주화하였다.

1) 분면을 타당하게 구성하고 타당한 해를 구한 유형

문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 모든 분면을 타당하게 구성한 뒤 초기 조건들을 모형에 적용하여 타당한 해를 도출한 유형이다. 이 유형에 해당되는 참여자는 물리 문제해결에 관한 모형구성의 전 과정을 과학적으로 타당하게 수행한 것으로 해석할 수 있다. [그림 4-1]은 이 유형에 대한 대표적인 사례로 S4가 2번 문항에 대해 작성한 활동지와 담화자료이다.

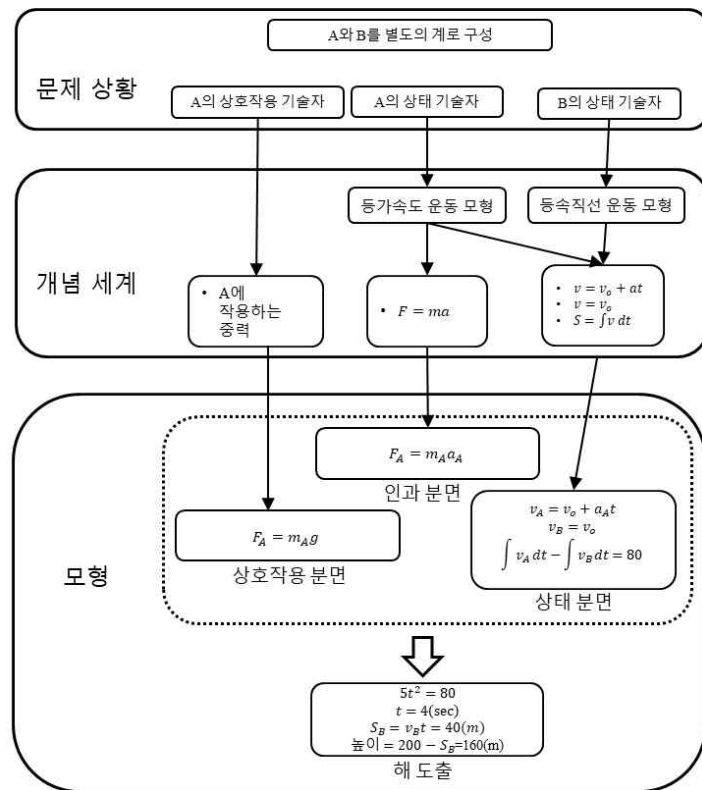
활동지	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.</p>  <div style="border: 1px solid red; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p>수학적 조작</p> $5t^2 = 80$ $t^2 = 16$ $t = 4$ <p>4초일때 충돌</p> <p>B: 1초당 10m가 빠르 200m에서 40m 내려가면 160m에서 충돌한다.</p> </div> </div>
담화 자료	<p>S4 : 이거는 그래프 문제야...80m인 상태에서 10m/s 나와 있으니까..10m/s에서 시작을 해야지...이게 그니까 일정 속도라 했을 때 이 상황이 A랑 애랑 80미터 떨어진 상태에 있을 때 A가 10m/s로 떨어지고 있다고 했으니까...그치? 그러면은 <u>A는 10m/s²주고 B는 그냥 쪽 10m/s야.</u> 애는 점점 더 빨리 내려가는데, 이렇게 둔 다음에 애가 80m였지. 충돌하면 80m가 딱 줄어들어야 하잖아. 그래서 A가 증가한 만큼의 거리가 80m가 돼야 해.</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p>상태 기술자 식별</p> <p>상호작용/인과 분면</p> </div>

[그림 4-1] 모형 분면을 타당하게 구성하고 타당한 해를 구한 유형

먼저 S4는 문항에서 제시된 정보들을 바탕으로 물체 A는 일정한 가속도로, 물체 B는 일정한 속력으로 낙하하고 있음을 인지하고(상태 기술자 식별) 개념 모형으로 A는 등가속도 운동, B는 등속직선 운동 모형을 선택하였다. 상호작용 분면과 인과 분면은 A의 가속도를 10m/s^2 로 구하는 과정에서 확인할 수 있었다. S4는 물체 A와 B의 시간에 따른 상태 변화를 그래프로 표현하였다(상태 분면). S4는 그래프를 그리는 과정에서 어떠한 개념 세계의 요소를 인출하였는지 세부적인 내용은 설명하지 않았으나 암묵적으로 등가속도 운동과 등속 직선 운동에서의 상태 기술자들의 관계를 적용한 것으로 보인다. 최종적으로 S4는 v-t 그래프에서 A와 B의 넓이차가 80이 되는 t에 대한 방정식을 구성하고 t값을 구하였다. 그리고 $S_B = 40(\text{m})$ 임을 통해 160m 상공에서 A와 B가 충돌한다는 최종

해를 도출하였다(수학적 조작).

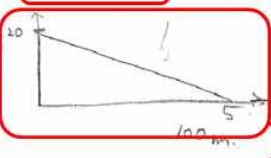
[그림 4-2]에 2번 문항에 관한 S4의 모형구성 과정을 도식화하여 표현하였다.



[그림 4-2] 2번 문항에 대한 S4의 모형구성

2) 모형을 타당하게 생성했으나 수학적 조작에서 오류를 범한 유형

이번 항목에서 다룬 유형은 학습자가 문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 각 분면을 타당하게 구성한 경우이다. 1)과의 차이점은 수학적 조작 단계에서 계산 오류를 범하여 타당하지 않은 해를 구했다는 점이다. [그림 4-3]은 이 유형에 대한 대표적인 사례로 S4가 4번 문항에 대해 작성한 활동지와 답화자료이다.

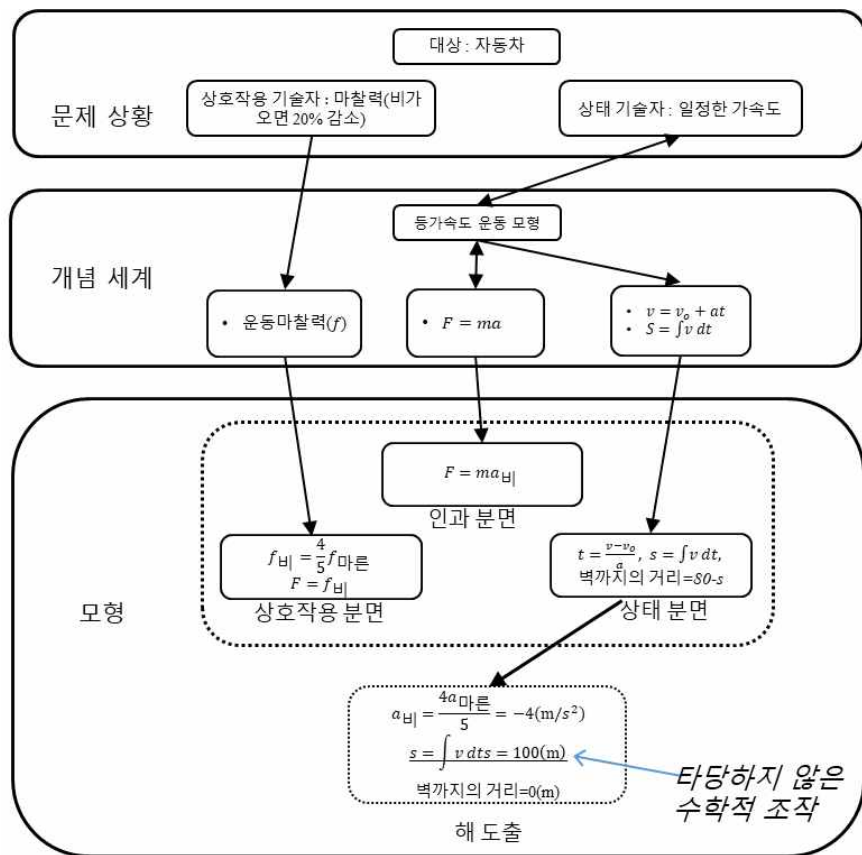
활동지	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>상호작용 기술자 식별</p> <p>※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.</p> <p>$a = -\frac{20}{4} = -5$</p> <p>$F = -5m$</p> <p>마찰력 20% 감소라니</p> <p>$F = -5m \times \frac{4}{5} = -4m$</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>상태 기술자 식별</p> <p>$a = -4 \frac{m}{s^2}$</p> <p>인과 분면</p>  <p>상태 분면</p> </div> </div> <hr/> <p>※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요</p> <p>$20 \times 5 \times \frac{1}{2}$ <u>20m가 아닌 100m</u> 타당화</p> <p>원래: $20 \times 5 = 100m$ ∴ 20m 추가이므로</p> <p style="text-align: right;">타당하지 않은 수학적 조작</p>
담화 자료	<p>S4: 3번이 맞다고?...나 이거 식 어떻게 했냐면...이거 삼각형 공식 안 써서 20×5에다가 100m하니까...잘못 푼 거 같아.</p>

[그림 4-3] 모든 분면을 타당하게 구성했으나 계산 오류를 범한 유형

이 유형의 대표적인 사례인 4번 문항의 S4는 먼저 그래프로 제시된 자동차의 운동 상태를 해석하여 자동차가 일정한 크기($a = 4m/s^2$)의 가속도로 운동하고 있음을 인지한 것으로 판단된다(상태 기술자 식별). 마찰력이 20% 변한다는(상호작용 기술자 식별) 정보를 바탕으로 상호작용 분면과 인과 분면을 구성하여 대상의 가속도를 구하였다. 그리고 등가속도 운동 모형을 선택하여 속도-시간 그래프로 자동차의 속도 변화를 기술한 뒤(상태 분면) 그래프의 넓이를 계산하여 변위를 계산하는 과정에서 오류를 범하였다(타당하지 않은 수학적 조작). 담화 자료를 보면 S4는 정답을 제출한 이후에 스스로 그래프의 넓이를 구하는 과정에서 오류를 범했음을 확인한 것으로 보인다(타당화). S4와 같이 모든 분면을 타당하게 구성했으나 수학적 조작에서 계산 오류를 범한 경우를 1)과 구분하여 별개의 유형으로 분류하였다.

[그림 4-4]에 S4의 모형구성 과정을 도식화하여 표현하였다. 4번 문항

의 경우 제시문에서 자동차의 운동 상태를 그래프로 제시했기 때문에 상태 기술자를 식별하기 위해서는 등가속도 운동 모형에 대한 이해가 필요하다. 따라서 [그림 4-4]에서 등가속도 운동 모형과 상태 기술자를 연결하는 화살표를 양방향으로 표시하였다. 이와 같이 개념 세계는 모형을 생성하기 위한 모형의 요소 역할을 수행할 뿐만이 아니라 문제 상황을 인식하기 위한 도식으로써의 기능을 포함하고 있다(Lopes & Costa, 2007).



[그림 4-4] 4번 문항에 대한 S4의 모형구성

3) 모든 분면을 구성하였으나 일부 분면의 타당성 결여된 유형

이 유형은 참여자가 문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형을 생성하였으나 일부 분면의 타당성이 결여된 경우이다. [그림 4-5]는 이 유형의 대표적인 사례로 7번 문항 S8의 활동지와 담화자료이다.

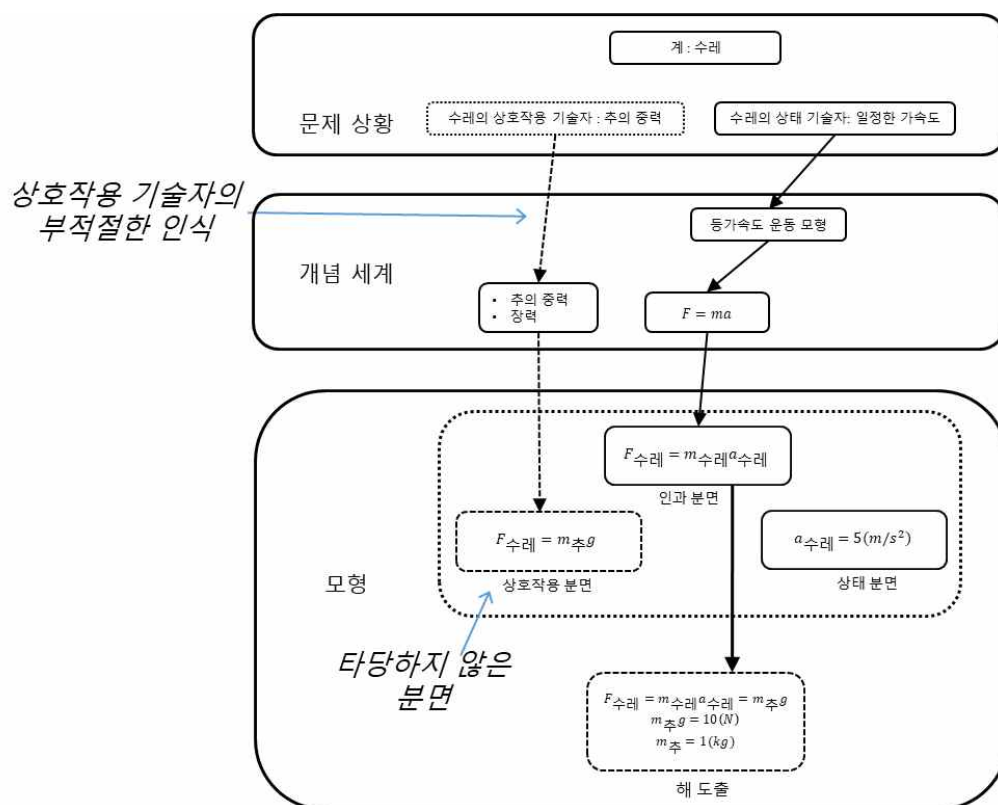
활동지	<p>* 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> $F=ma$ $=2 \times 5 = 10$ $\therefore F = 10N$ </div> <div style="border: 1px dashed red; padding: 5px;"> $10N = m \times 10$ $\therefore m = 1$ $\therefore \text{추 } 1\text{개}$ </div> </div> <p style="text-align: right;">상호작용 분면</p> <p style="text-align: center;">수학적 조작</p> <p style="text-align: left;">인과 분면</p>
담화 자료	<p>S8: 일단 수레에 힘이 몇 N 작용하고 있어?...오케이 그럼 <u>$F=10N$ 그치?</u> (활동지를 가리키면서) 근데 여기서 수레 <u>한테 뭐가 힘을 작용하고 있어?...추가 작용하고 있지.</u> <u>추, 추의 힘이 몇이야? 10n이지 10n,추가 n개 있을 때.</u> 그럼 10n, 그럼 10N의 힘을 내겠지. 근데 이게 10n과 같 다 그래서 n이 1.</p> <p style="text-align: right;">상호작용 기술자 식별</p>

[그림 4-5] 일부 분면의 타당성 결여된 유형(7번 문항 S8)

S8은 기술자 식별 단계에서 수레의 가속도가 일정하다는 것을 암묵적으로 인지하고 뉴턴의 운동 2법칙을 적용하여 먼저 수레에 작용하는 알짜힘을 구하였다(인과 분면). 그러나 상호작용 분면을 형성하는 과정에서 수레에 작용하는 장력을 포함하지 않고 추의 중력만을 적용하여 상호작용 분면을 형성하였다(상호작용 분면). 이는 S8이 추의 중력을 수레에 작용하는 상호작용으로 오인했기 때문이다(상호작용 기술자 식별). 상호작용 기술자에 대한 부적절한 식별로 인해 상호작용 분면 역시 타당성이 결여되게 된다. 결국 S8은 수학적 조작 단계에서 초기 조건을 대입하여 적절하게 대입하였음에도 불구하고 타당하지 않은 해를 구하게 되었다. S8은 모든 분면을 구성하여 해를 도출했다는 점에서 1)과 2)의 사례들과

마찬가지로 완성된 모형을 생성했다고 할 수 있다. 그러나 타당하지 않은 상호작용 기술자 식별로 인해 일부 분면의 타당성이 결여되었다.

[그림 4-6]에 7번 문항에 관한 S8의 모형구성을 도식화하여 표현하였다. 앞에서 제시한 활동지와 담화 자료에서는 상태 기술자의 식별과 개념 모형의 선택이 드러나지 않았다. 이는 연구자가 S8이 작성한 활동지와 담화자료를 바탕으로 추론한 것으로 S8의 이러한 과정은 암묵적 혹은 무의식적으로 이루어진 것으로 보인다.



[그림 4-6] 7번 문항에 대한 S8의 모형구성

4) 일부 분면만을 구성한 유형

이 유형은 참여자가 대상의 기술자를 식별하고 이에 적합한 개념 모형을 선택하였으나 일부 분면만을 구성한 경우이다. [그림 4-7]은 이 유형에 대한 대표적인 사례인 S13이 8번 문항에 대해 작성한 활동지와 담화

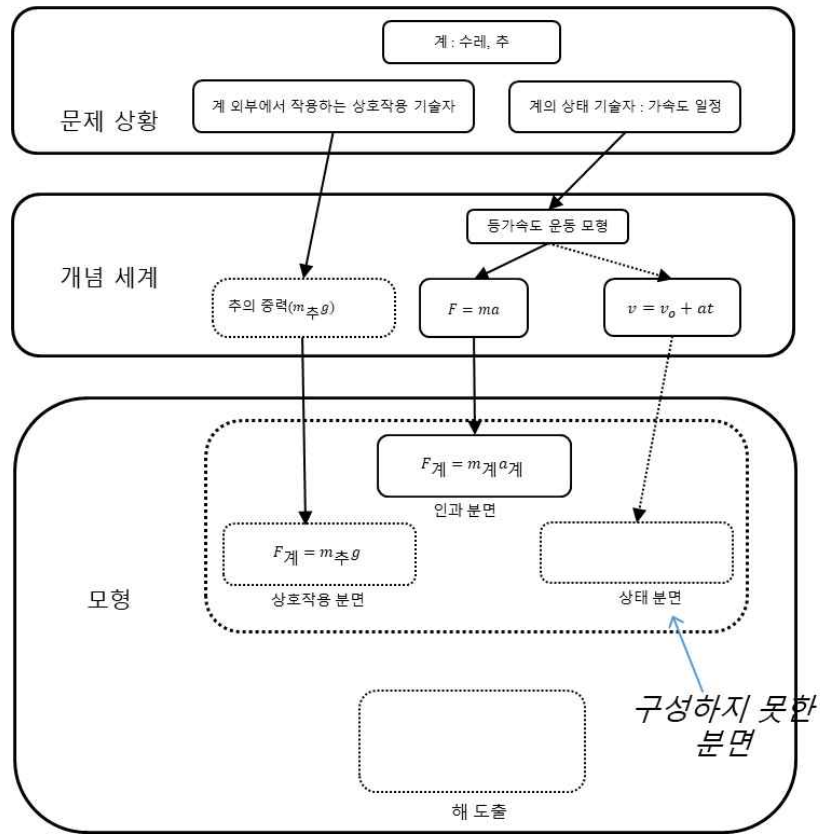
자료이다.

활동지	<p>※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> $\frac{10}{2+1} = \frac{10}{3} \text{ m/s}^2$ <p style="color: red;">상호작용/ 인과 분면</p> </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> $\frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times \frac{10}{3} \times 2^2 = 29$ <p style="color: red;">속도에 관한 상태 분면을 구성하지 못함</p> </div> </div>
담화 자료	<p>S13: <u>(10번 활동지에 공식을 쓰며) 야 이거 공식이 이거냐?</u></p> <p>S10: 응. 이거 거리.</p> <p>S13: <u>거리라고?</u></p>

[그림 4-7] 일부 분면만을 구성한 유형

[그림 4-7]에서 상호작용과 인과 분면에 해당되는 수식을 보면 S13은 수레와 추를 하나의 계로 설정한 뒤 추의 중력에 관한 상호작용 분면을 구성한 것으로 해석된다. 이후 S13은 등가속도 운동 모형을 선택하여 인과 분면을 형성하고 이를 통해 수레의 가속도를 구하였다. 그러나 속도에 관한 상태 분면이 아니고 거리에 대한 상태 분면의 구성을 시도하는 바람에 S13은 상태 분면을 타당하게 형성하지 못하게 되었다. 이는 S13의 등가속도 운동 모형의 속도와 거리의 관계에 대한 이해가 충분하지 못했기 때문으로 보인다.

[그림 4-8]에 8번 문항 S13의 모형구성을 도식화하였다. S13은 적합한 상태 분면을 형성하지 못해 결국 문제에서 요구하는 해의 도출에 실패하였다. 따라서 [그림 4-8]에서는 상태 분면과 해 도출을 공란으로 표시하였다.



[그림 4-8] 8번 문항에 대한 S13의 모형구성

5) 부적절한 개념 모형을 선택한 유형

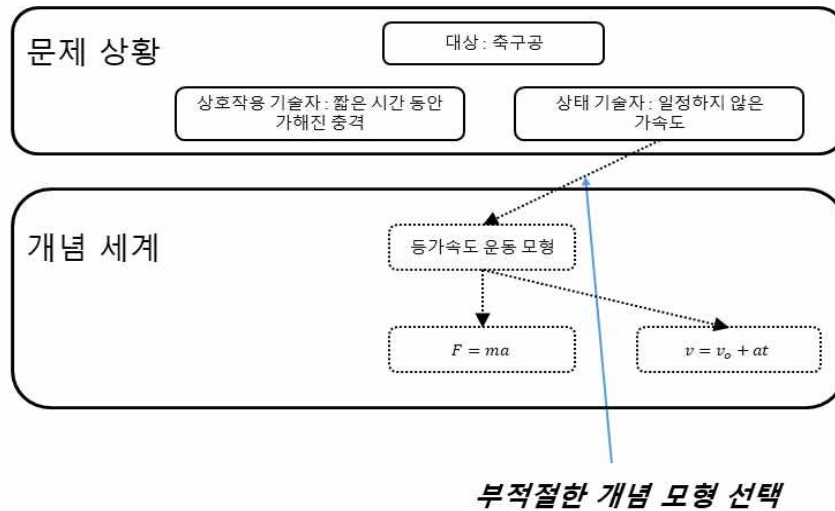
이 유형은 참여자가 타당한 기술자 식별을 기반으로 문제 상황에 부적절한 개념 모형을 선택한 유형이다. [그림 4-9]는 이 유형의 대표적인 사례인 S25가 11번 문항에 대해 작성한 활동지와 전사 자료이다.

활동지	<p>풀이과정은 여기에 적어주세요</p> <p>$200N = 0.5 \text{ kg} \times a$</p> <p>$a = 400 \times 0.03$</p> <p>$= 12 \text{ m/s.}$</p> <p>$0 \text{ m/s} \rightarrow 12 \text{ m/s.}$</p> <p>부적절한 개념 모형 채택</p>
담화 자료	<p>S25: 그냥 속도 구하라니까 속도 있는 거 다 구했는데, 애 힘 이잖아...아 그러면 애(가속도)를 400으로 두고...근데 애가 힘이니까 질량 나누면 가속도이고, 속력이 나오는 데...</p>

[그림 4-9] 부적절한 개념 모형을 선택한 유형

11번 문항은 앞의 문항들과 달리 계의 가속도가 일정하지 않고 시간에 따라 변하는 상황에 관한 것이었다. 따라서 등가속도 운동 모형 대신 충격에 의한 운동 모형을 선택하여야만 해결이 가능한 문항이다. 그러나 담화 자료와 활동지에서 드러나듯이 S25는 문제 상황에 적절한 개념 모형을 선택하지 않고 등가속도 운동 모형을 선택하고 임의로 초기 조건을 대입하여 해를 구였다. 이렇게 참여자가 문제 상황에 부적절한 개념 모형을 선택하여 모형을 생성한 경우를 별도의 유형으로 분류하였다. 이 유형의 학생들은 적절한 기술자 식별이 뒷받침되지 않았거나 적합한 개념 모형에 대한 지식이나 이해가 부족하여 자신이 개념 모형을 임의적으로 선택한 것으로 보인다(Halloun, 2006).

[그림 4-10]에서 11번 문항에 대한 S25의 모형구성을 도식화하여 설명하였다.

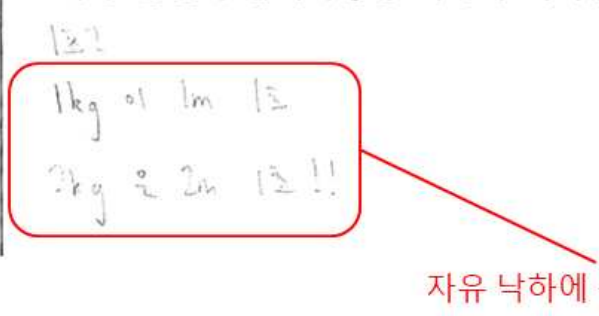


[그림 4-10] 11번 문항에 대한 S25의 모형구성

6) 비과학적인 직관이나 추측을 통해 해를 선택한 유형

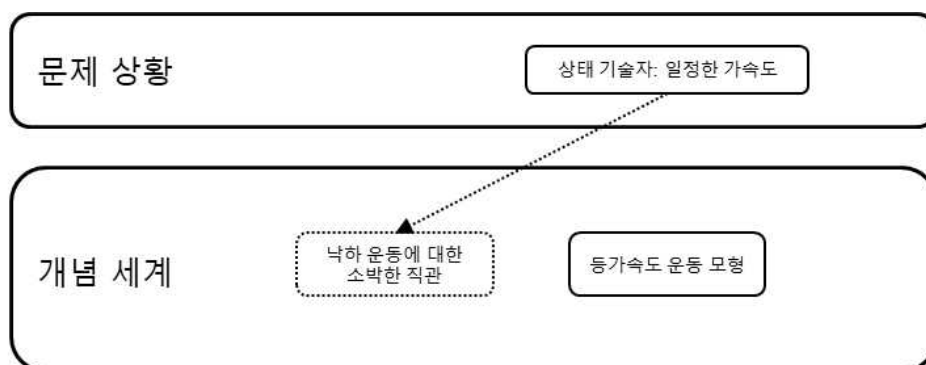
이 유형은 참여자가 문제 상황에 적합한 과학적인 개념 모형을 선택하지 않고 직관이나 추측에 의해 정답을 선택하는 경우이다. 5)의 유형이 문제 상황에 대응되지는 않았지만 그 자체로는 과학적 개념 모형을 선택한 것과 달리 이 유형에서는 과학적인 개념 모형을 선택하지 않고 직관에 의해 정답을 추정하는 경우이다. [그림 4-11]은 이 유형의 대표 사례로 S20이 1번 문항에 대해 작성한 활동지와 담화 자료이다.

담화 자료에서 구체적으로 드러나듯이 S20은 무거운 물체가 가벼운 물체에 비해 낙하 속도가 더 빠르며 낙하 시간은 높이에 비례한다는 직관적인 사고에 의거하여 해를 선택하였다. 대상의 상태 및 상호작용 기술자에 관한 명확한 인식이 드러나지 않으며 적합한 개념 모형을 선택하는 과정도 나타나지 않았다. 대신 S20은 개념 세계의 소박한 이론을 통해 문제 상황을 설명하고자 한다. 이렇게 문제 상황에 대한 기술자 식별과 적합한 개념 모형을 선택하는 과정이 드러나지 않고 참여자들이 소박한 이론에 기반한 직관이나 추측을 통해 직접적으로 해를 선택하는 유형이 마지막으로 식별되었다.

활동지	 <p>1초?</p> <p>1kg 이 1m 1초</p> <p>2kg 은 2m 1초!!</p> <p>자유 낙하에 관한 소박한 직관</p>
담화 자료	<p>S20: 1kg이 1m를 떨어지는데 1초가 걸렸잖아. 그럼 2kg이 2m에서 떨어지는데 몇 초가 걸리겠어? <u>똑같이 1초가 걸리지. 질량이 따블 됐잖아. 따블. 질량이 따블되고 높이도 따블됐으니까.</u></p>

[그림 4-11] 비과학적인 직관이나 추측을 통해 해를 선택한 유형

[그림 4-12]에서 1번 문항에 대한 S20의 모형구성을 도식화하였다. S20이 문제 상황에 적절한 과학적 개념 모형 혹은 개념들을 인출하지 않고 낙하 시간은 높이에 비례하고 질량에 반비례한다는 소박한 직관을 이용한 것을 점선 화살표로 표현하였다.



[그림 4-12] 1번 문항에 대한 S20의 모형구성

7) 유형 분류 불가

일부 사례의 경우 활동지나 전사 자료에서 참여자의 모형구성 과정과 결과가 전혀 언급되지 않아 모형구성을 분류하기에 정보가 부족하였다. 본 연구에서는 이 경우를 분류 불가로 표현하였다.

앞에서 정리한 모형구성 유형들을 [표 4-1]에 요약하여 정리하였다.

[표 4-1] 본 연구 참여자들의 모형구성 유형

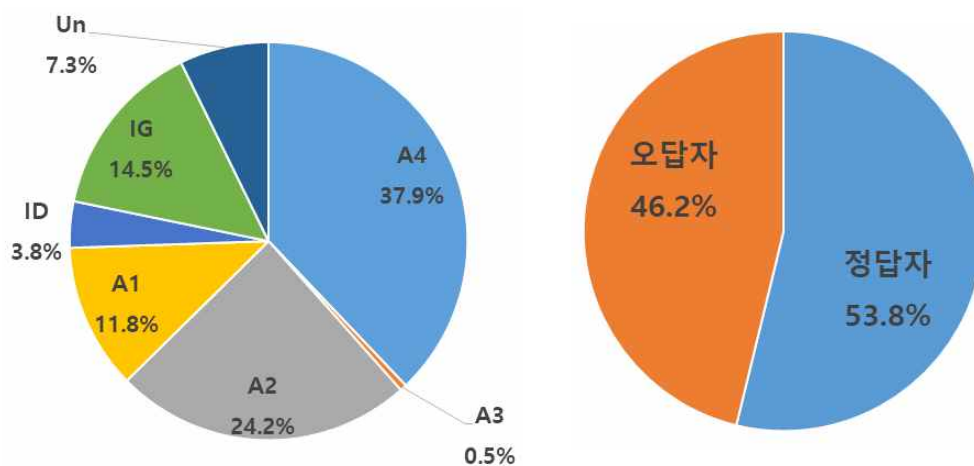
유형	코드	설명
모형의 모든 분면을 타당하게 구성	A4	문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 모든 분면을 타당하게 구성함. 초기 조건들을 모형 분면에 적용하여 타당한 해를 도출함
모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함	A3	문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 모든 분면을 타당하게 구성함. 초기 조건들을 적용하여 해를 도출하는 과정에서 수학적인 오류를 범함
모든 분면을 구성하였으나 일부 분면의 타당성 결여	A2	문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모든 분면을 구성했으나 일부 분면의 타당성이 결여됨. 초기 조건들을 타당성이 결여된 모형 분면에 적용하여 해를 도출함
일부 분면만을 구성	A1	문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하였으나 일부 분면만을 구성함
부적절한 개념 모형 선택	ID	문제 상황의 특정 유형에 부적합한 개념 모형을 선택함
직관이나 추측에 의한 해의 선택	IG	문제 상황에 개념 모형을 선택하지 않고 비과학적인 직관이나 추측을 통해 해를 선택함
분류 불가	Un	활동지나 담화를 통해 학습자의 과학적인 모형구성 과정과 결과를 확인할 수 없음.

8) 모형구성 유형 분포와 정답률 비교

[그림 4-13]에서 12개 문항, 372건의 모형구성 유형 분포와 정답률을 비교하였다. 12개 문항 372건의 모형구성 유형 중에서 가장 많은 비중을

차지하고 있는 유형은 모든 분면을 타당하게 구성(이하 A4)로서 전체의 37.9%를 차지하고 있다. 모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함(이하 A2)이 24.2%로 그 뒤를 잇고 있다. 직관이나 추측에 의한 해의 선택(이하 IG), 일부 분면만을 구성(이하 A1), 분류 불가(이하 Un), 부적절한 개념 모형 선택(이하 ID) 등은 15% 미만의 작은 비중을 차지하고 있다. 모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함(이하 A3)은 단 2건(0.5%)에 불과하여 대부분의 학생들은 분면을 타당하게 형성하면 수학적 조작에서는 실수를 하지 않는 것으로 나타났다.

전체 문항의 모형구성 유형 분포와 정답률을 비교해보면, 모형구성의 관점에서 가장 타당한 모형을 구성한 A4 유형(37.9%)과 정답자(53.8%)의 비중은 상당한 격차를 보이고 있다[그림 4-13]. 즉, A4 유형을 모두 정답자라고 간주해도 타당한 모형을 구성하지 못한 참여자들의 1/4 정도를 정답자로 간주해야 이 차이를 설명할 수 있다. 이러한 결과는 정답이 반드시 학생들의 타당한 모형구성을 의미하지 않으며 물리 문제해결에 관한 질적 분석의 당위성을 제공한다고 볼 수 있다.



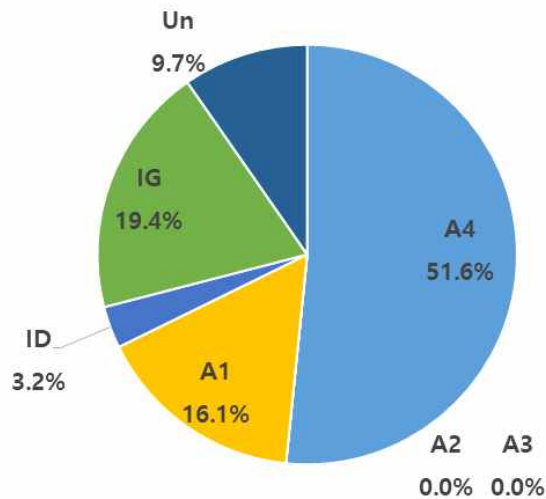
[그림 4-13] 전체 문항의 모형구성 유형 분포와 정답률 비교

4.1.2. 모형구성에서 학생들의 어려움

본 절에서는 각 문항별로 동일한 유형의 모형구성을 한 참여자들의 일관된 특징을 식별하여 모형구성에서의 어려움을 분석하였다. 본 연구에 참여한 학생은 총 32명이나 1차시(1번 문항~6번 문항)에서는 S18이, 2차시(7번 문항~12번 문항)에 S3이 결시했으므로 각 문항별 31명의 학생들만을 대상으로 분석이 진행되었다. 따라서 각 문항별 모형구성 사례는 31건이며, 전체 문항의 사례는 372건이었다.

1) 1번 문항

1번 문항은 중력장에서 자유 낙하하는 물체의 낙하 거리와 시간에 관한 문항이다. 문제 상황에서 1개 물체만을 다루고 상호작용이 중력 이외에는 없어 다른 문항들에 비해 상대적으로 모형구성이 복잡하지 않다. [그림 4-14]에 1번 문항의 모형 구성 유형 분포를 나타냈다.



[그림 4-14] 1번 문항의 모형구성 유형 분포

1번 문항의 모형구성 유형 분포에서 주목할 부분은 A4의 비율이 상대적으로 높은 반면, A3과 A2는 1건도 없었다는 점이다. 특히, A2 유형의

참여자가 한 명도 없었다는 것은 1번 문항은 등가속도 운동 모형을 선택하면 비교적 수월하게 모든 분면을 구성할 수 있었던 것으로 해석할 수 있다.

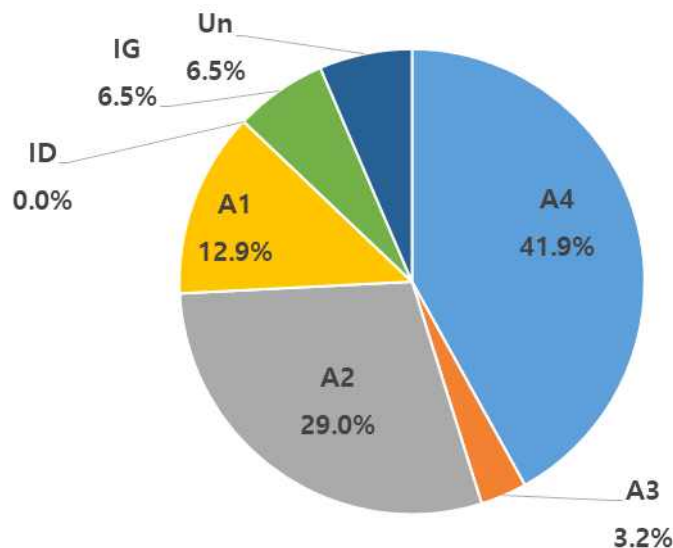
[표 4-2]에서 A4 유형을 제외한 참여자들의 어려움을 기술하였다. A1 유형에 속한 5명의 참여자 중에서 3명은 인과 분면과 상호작용 분면을 구성했지만 상태 분면을 구성하지 못했다. 이는 등가속도 운동의 위치와 시간, 가속도 간의 관계식인 $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 에 대한 상기가 잘 이뤄지지 않은 탓으로 여겨진다. 본 연구의 1차시 수업이 학생들이 뉴턴의 운동 법칙을 학습한 지 5개월가량 지났음을 감안할 때 수업하는 시점에서 일부 참여자들의 등가속도 운동과 관련된 개념 간의 관계나 공식의 상기가 잘 이뤄지지 않은 것으로 해석할 수 있다. IG 유형의 참여자들은 무거운 물체가 가벼운 물체에 비해 낙하 속도가 더 빠르며 낙하 시간은 높이에 비례한다는 직관적인 사고에 의거하여 정답을 선택하였다. 이들은 문제 상황에 대응되는 과학적인 개념 모형을 선택하지 않았으며 등가속도 운동 모형과 관련된 개념이나 지식을 활용하여 모형을 생성하지 못했다.

[표 4-2] 1번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A1	3, 13, 26	인과 분면과 상호작용 분면은 구성했으나 두 물체의 상태 분면을 구성하지 못함
	1, 27	역학적 에너지 보존 모형을 선택하였으나 속도와 낙하 시간이 비례한다는 것에 대한 상태 분면을 구성하지 못함
ID	20	중력에 의한 퍼텐셜에너지를 구한 다음 이 값이 시간에 비례한다고 임의적으로 판단함
IG	7, 8, 11, 23, 25, 32	낙하시간과 질량이 비례하고 높이에 반비례한다는 직관에 기반하여 해를 선택함

2) 2번 문항

2번 문항은 1번 문항과 마찬가지로 자유낙하에 관한 상황을 제시하고 있으나 대상이 복수이며 대상들의 시간에 따른 상태 변화가 상이하다는 점에서 차이를 보인다. 물체 A는 등가속도 운동, 물체 B는 등속 직선 운동을 하고 있다. [그림 4-15]에 2번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다.



[그림 4-15] 2번 문항의 모형구성 유형 분포

2번 문항은 고전적인 통계상으로는 1번 문항과 정답률이 큰 차이를 보이지 않아 비슷한 난이도의 문항으로 받아들일 수 있다(1번 문항 정답률 67.7%, 2번 문항 정답률 64.5%). 그러나 모형구성 유형으로 분석한 결과 2번 문항은 1번 문항에 비해 A4가 10%로 하락했으나 A2는 29%로 큰 폭으로 증가하여 모든 분면을 구성한 참여자들(A4+A3+A2)의 비율(75%)이 1번 문항에 비해 훨씬 높은 수치를 보이고 있다. 또한 ID와 IG유형의 합이 7%에 불과하여 1번 문항에 비해 과학적인 개념 모형을 선택하여 모형구성을 시도한 참여자들이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

[표 4-3]에서 A4 유형을 제외한 참여자들의 모형구성 어려움을 기술하였다. 2번 문항의 A2, A1 유형의 참여자들은 모두 상태 분면으로 인

해 타당한 모형을 생성하지 못하였다. 즉, 일부 참여자들은 두 물체의 상대적인 위치를 고려하여 두 물체의 이동 거리를 하나의 좌표계에서 표현하는 것에 어려움을 겪고 있는 것으로 보인다. A2 유형으로 분류된 일부 참여자들(S7, S11, S25)은 시간에 따른 A, B의 위치를 열거하여 만나는 시간을 찾고자 했으나 구간별 평균속도를 잘못 산출하여 정확한 시간을 도출할 수 없었다. 이들은 A, B의 위치가 가장 근접한 시간을 자신들의 해로 선택하였다. 1번 문항의 학습 효과 때문에 등가속도 운동 모형의 상태 기술자들의 관계를 묻거나 자유 낙하에 관한 소박한 직관에 의해 해를 선택한 참여자들은 거의 관찰되지 않았다.

[표 4-3] 2번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

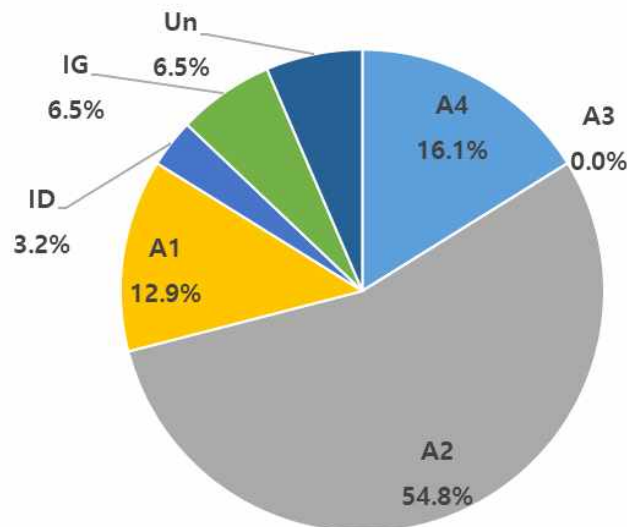
모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A3	17	v-t 그래프로 상태 분면을 생성한 뒤에 그래프의 넓이를 계산하여 해를 도출하는 과정에서 오류를 범함
A2	2, 12, 15, 26, 27, 30	상태 분면에서 물체A와 물체B의 낙하거리에 관한 관계식이 타당하지 않음
	7, 11, 25	상태 분면에서 일정한 시간 구간별 이동거리를 계산하는 과정에서 각 구간의 평균 속도를 각 구간의 처음 속도로 오인함
A1	16, 31, 32	B의 상태 분면을 구성하지 못함
	3, 31	A와 B의 상태 분면을 모두 구성하지 못함
IG	8, 20	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

3) 3번 문항

3번 문항은 1, 2번 문항과 달리 중력이 아닌 지면과의 마찰력에 의해

물체가 등가속도 운동하는 상황을 제시한다. 타당한 문제해결을 위해서 브레이크를 밟은 후 자동차가 멈출 때까지의 시간이 아닌 벽을 발견 후 적어도 몇 초안에 브레이크를 밟는가에 관한 제시문의 요구 사항을 명확하게 이해해야 한다.

[그림 4-16]에 2번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 3번은 전체 문항 중에서 모형구성의 유형 분포가 독특한 문항이다. 3번 문항은 전체 문항 중에서 A4의 비율이 가장 낮고 A2의 비율은 가장 높게 나타났다. 그림에도 불구하고 정답률은 평균을 상회하는데(71.0%) 이는 A2로 분류된 대부분의 참여자들이 모형의 타당성과는 별개로 정답을 선택했기 때문이다.



[그림 4-16] 3번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-4]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 3번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. A2로 분류된 참여자들의 대다수가 브레이크가 작동하기까지의 시간을 브레이크가 작동한 시간으로 오인하여 상태 분면을 구성하였다. 타당하지 않은 모형임에도 불구하고 모형의 해가 정답과 일치하여 많은 학생들이 별 의심 없이 정답을 선택한 것으로 보인다. 이

를 통해 선다형 문항의 경우 학생들이 모형 타당성을 검증하는 단계에서 보기에 자신의 해가 있는지가 매우 중요한 기준이 된다는 것을 알 수 있다. 즉, 참여자들은 모형의 적합성과 같은 내적 요인보다는 보기와 해의 일치와 같은 외적 요인이 모형 타당화의 일차적인 기준이 되는 것으로 해석된다.

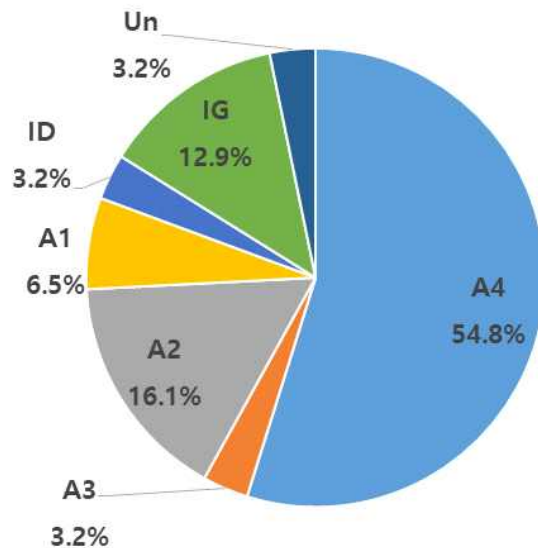
[표 4-4] 3번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	1, 2, 3, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 26, 31, 32	기술해야 하는 물체의 운동 시점을 오인하여 상태 분면을 구성함
	19	마찰력 이외에 수평방향으로 작용하는 힘이 있다고 판단하고 상호작용과 인과분면을 구성함.
A1	25, 27	자동차의 이동거리에 대한 상태 분면을 구성하지 못함
	12	일-에너지 모형을 적용하려고 했으나 인과 분면을 구성하지 못함
	22	속도에 대한 시간의 함수를 적분하여 위치를 구하고자 했으나 적분 과정에서 초기 조건을 적절하게 설정하지 못함.
ID	7	운동량 공식에 변인을 대입한 뒤 나온 결과 값으로 해를 추정함
IG	8, 30	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

4) 4번 문항

4번 문항은 3번 문항과 문제 상황의 물리적인 계는 거의 유사하다. 마찰력이 작용하는 자동차가 벽 앞에서 제동을 거는 상황이 3번과 일치하는데 차이점은 마찰력의 크기가 명시적으로 제시되지 않고 그래프를 통해 주어졌다는 것과 문항의 해가 시간이 아닌 거리라는 점이다.

[그림 4-17]에 4번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 4번 문항은 전체 문항 중 유일하게 정답률과 A4 유형의 비율이 일치하는 문항이다. 4번 문항의 정답률은 3번 문항에 비해 하락했으나(3번 문항 정답률 71.0%, 4번 문항 정답률 54.8%) A4의 비율은 큰 폭으로 증가하여 정답률과 모형구성 유형 분포의 변화가 서로 상반된 경향을 보이고 있다.



[그림 4-17] 4번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-5]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 4번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. A2로 분류된 5명 중 4명이 벽까지의 거리를 자동차가 이동한 거리를 오인하여 상태 분면을 구성하였다. 이는 타당하지 않은 기술자 식별이나 개념 모형을 적용하는 방법에 관한 인지적 결핍보다는 문항 제시문에 대한 이해와 주의가 부족했던 탓으로 여겨진다. 3번 문항에 비해 IG 유형이 2명 이상 증가하였는데 이는 4번 문항에서는 시간을 매개로 하지 않고 이동거리와 속도, 가속도간의 관계로 상태 분면을 구성해야 수학적 조작이 용이하기 때문이다. 시간을 매개하지 않은 상태 분면 구성에 일부 참여자들이 어려움을 느끼고 있는 것으로 파악된다.

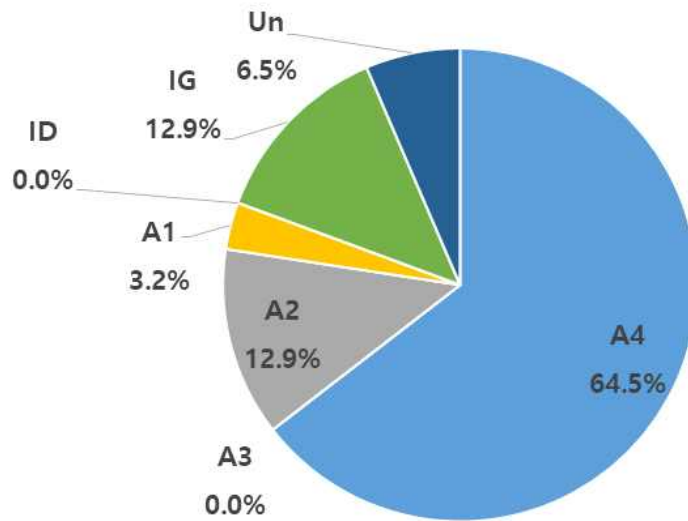
[표 4-5] 4번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A3	4	모든 분면을 타당하게 구성하였으나 그래프의 넓이를 구하는 과정에서 계산 오류를 범함
A2	14, 29, 30, 31	상태 분면에서 자동차의 이동 거리(s)를 벽까지의 거리(80-s)로 오인함
	19	마찰력의 변화를 고려하지 않고 상호작용 분면을 구성함
A1	22	상태 분면에서 자동차의 속도에 관한 함수를 구하고 이를 적분하여 위치에 함수를 구하고자 했으나 위치에 대한 초기 조건을 적절히 설정하지 못함
	25	자동차의 상태 분면을 구성하지 못함
ID	20	적절한 모형 구성 과정 없이 문제에서 주어진 v-t그래프의 넓이를 해라고 판단함
IG	3, 6, 12, 27	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

5) 5번 문항

5번 문항은 마찰력이 작용하고 있는 상태에서 등속직선 운동하고 있는 카트에 관한 것이다. 마찰력이 문제 상황에서 명시적으로 제시되지 않았기 때문에 참여자들이 초기 조건을 통해 이를 유추해야 한다.

[그림 4-18]에 5번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 5번은 전체 문항 중에서 A4의 비중이 가장 큰 문항이다. 반면 A2와 A1의 비중은 작은 편으로 적절한 개념 모형을 선택한 참여자 대부분은 모든 분면을 타당하게 생성한 것으로 볼 수 있다.



[그림 4-18] 5번 문항의 모형구성 유형 분포

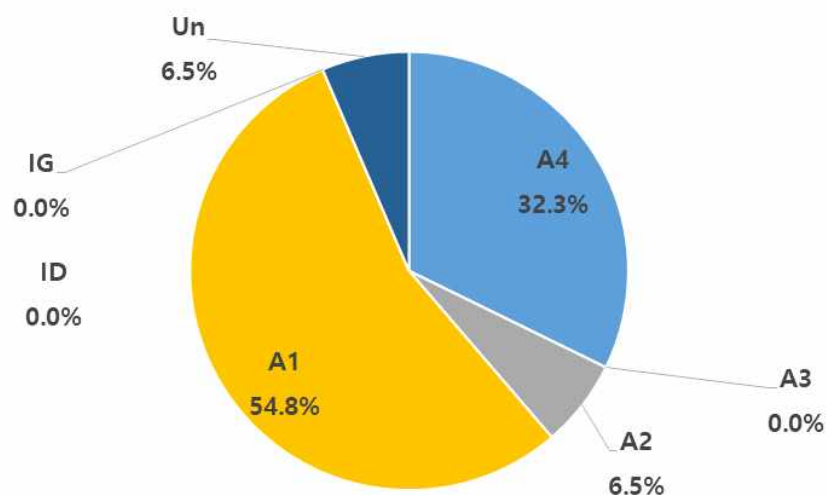
[표 4-6]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 5번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. 5번 문항에서는 마찰력의 식별, 즉 상호작용 기술자의 식별이 모형구성에 있어 핵심적인 문항이다. 문항에서 마찰력을 명시적으로 제시하지 않았으므로 참여자들은 외력이 작용함에도 일정한 속도로 움직이고 있다는 문제 상황을 통해 카트에 작용하는 마찰력을 추론해야 한다. 참여자가 마찰력을 적용하여 상호작용 분면을 구성한다면 앞의 문항에 비해 상대적으로 상태 분면의 구성이 용이한 문항이다. A2 유형으로 분류된 4명의 학생들은 개념 모형으로 등속직선 운동을 선택하여 각 분면을 구성하였는데 이는 마찰력에 대한 타당한 인식이 뒷받침되지 않았거나 등속직선 운동에서의 물체에 작용하는 힘에 대한 오개념(Champagne *et al.*, 1980; Gilbert & Watts, 1988; Halloun & Hestenes, 1985)이 영향을 미친 것으로 해석될 수 있다. 따라서 학생들은 문제에서 명시적으로 제시되지 않은 상호작용을 식별하는데 어려움을 겪었으며 이는 상호작용 분면 구성에 부정적인 영향을 끼친 것으로 해석된다.

[표 4-6] 5번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	3, 25, 32	상호작용 분면에서 물체에 작용하는 알짜힘이 0이라 인지함
	11	상호작용 분면에서 물체에 작용하는 알짜힘이 오른쪽으로 작용한다고 오인하여 나머지 분면을 구성함
A1	30	상태 분면을 구성하지 못함
IG	7, 20, 22, 31	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

6) 6번 문항

6번 문항은 5번 문항과 문제 상황이 거의 유사하지만 카트에 작용하는 계 외부의 상호작용이 복수이며 시간을 매개하지 않고 상태 기술자의 변화를 기술해야 한다는 점에서 차이를 보인다. 6번 문항에서는 처음으로 복수의 상호작용이 작용하는 상황이 다뤄지고 있으므로 참여자들은 모형 구성 과정에서 상호작용 기술자 간의 관계를 고려해야 한다. [그림 4-19]에 6번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다.



[그림 4-19] 6번 문항의 모형구성 유형 분포

6번 문항은 전체에서 A2의 비중은 가장 작고 A1의 비중이 가장 큰 문항이다. 이는 특정 분면을 구성하지 못한 참여자들이 많다는 것을 의미한다. 또한 IG와 ID가 0명인 것으로 보아 대부분의 참여자들이 최소한 개 이상의 분면을 형성한 것으로 이해할 수 있다.

[표 4-7]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 6번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. 결과를 보면 A1 유형의 참여자들은 대부분 상태 분면 구성에 어려움을 겪은 것으로 이해된다. 일반적으로 고등학생들은 등가속도 운동 상황에서 카트의 속도를 시간에 대한 함수로 기술하는데 익숙한 반면, 시간을 매개하지 않고 이동 거리와 속도를 관계 짓는데 어려움을 겪는다(Lim & Lee, 2015). 이러한 어려움이 6번 문항의 상태 분면 구성에서 나타난 것으로 해석된다. 또한 A1 학생들 중에서 일부는 카트에 작용하는 마찰력을 인식했음에도 인과 분면에서 카트의 가속도를 구하는 과정에서 오류를 범한 것으로 나타났다. 이는 문제해결과정에서 외력=알짜력(Alonzo & Steedle, 2009)으로 인식하는 경향이 6번 문항에 관한 모형구성에서도 드러났다고 할 수 있다. 6번 문항도 5번 문항 마찬가지로 역학 분야의 전통적인 오개념이 기술자 식별에 어떤 영향을 끼치는지 대표하는 사례라 할 수 있다. 이를 요약하면 6번 문항의 경우 명시적으로 제시되지 않은 상호작용의 인식과 계에 작용하는 외력과 알짜힘 간의 혼동이 모형구성 과정에서 참여자들이 겪는 핵심적인 어려움으로 파악된다.

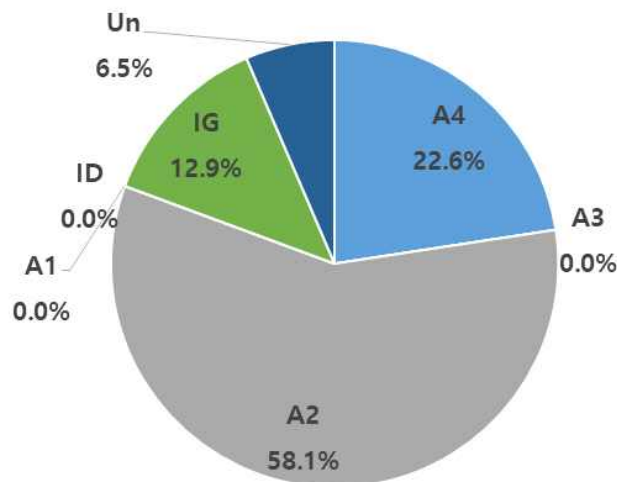
[표 4-7] 6번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	1, 20	상호작용 분면에서 마찰력의 크기를 10N으로 오인하여 인과 분면과 상태 분면을 구성함
	2, 7, 11, 13, 22, 23, 25, 26, 31	상호작용 분면에서 마찰력의 크기를 10N으로 오인하여 인과 분면을 구성함
A1	3, 15, 19, 24, 27, 29, 30, 32	인과 분면과 상호작용 분면은 타당하게 구성했으나 상태 분면을 구성하지 못함
	12	마찰력을 무시하고 철수가 미치는 힘만으로 상호작용 분면을 구성하여 인과 분면을 구성함

7) 7번 문항

7번 문항은 등가속도 운동의 대표적인 예시인 Atwood machine에 대한 것으로 실에 의해 구속된 두 개의 물체가 문제 상황으로 제시된다는 점에서 계의 설정이 모형을 구성하는데 있어 중요한 역할을 하게 된다. 즉, 수레와 추를 하나의 계로 설정할 것인가 아니면 별개의 계로 설정할 것인가에 따라 상호작용과 인과 분면이 다르게 형성된다.

[그림 4-20]에 7번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 7번 문항은 A2의 비율이 높은 문항으로 정답률도 32.3%에 그쳐 고전적인 관점과 모형구성의 측면에서 모두 까다로운 문항임을 알 수 있다. 주목할 만한 부분은 A1 유형이 한 명도 없었다는 점인데 이는 7번 문항의 경우 상호작용과 인과 분면 형성이 까다로운데 반해 상태 분면은 참여자가 별도로 고려할 필요 없이 제시문의 상황을 그대로 받아들이면 되기 때문으로 여겨진다.



[그림 4-20] 7번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-8]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 7번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. 대부분의 A2 유형 참여자들은 상호작용 분면에서는 수레와 추에 작용하는 장력을 인지하지 못하고 추의 중력이 그대

로 수레에 작용한다고 오인하였다. 즉, 장력에 관한 지식이나 개념의 결핍으로 인해 기술자 식별 단계에서 추와 수레 사이의 상호작용을 인식하지 못하고 상호작용 분면을 구성한 것으로 파악된다. 하지만 참여자들이 장력을 사전에 학습하지 못해 정확한 용어와 개념을 모르더라도 추의 가속도가 5 m/s^2 인 초기조건을 이용하면 추에 중력과 반대 방향의 또 다른 힘이 작용해야 함을 유추할 수 있다. 수레와의 상호작용이 추의 운동에 영향을 미친다는 점에서 추는 계 외부에 있는 동인이 아니라 계 내부에 속한 대상이다(Halloun, 2006). 모형의 각 분면 간에는 정합이 이뤄져야 함(Lee & Yoo, 2017)에도 학생들은 문제에서 기술을 요하는 수레에 대해서만 모형을 구성하고 추에 대해서는 모형구성을 시도하지 않았다. 이로 인해 초기 조건과 분면 간에 일관성이 없었음에도 학생들은 이를 인지하지 못했다.

반면, 수레와 추를 하나의 계로 보면 장력은 계 내부에 작용하는 힘이므로 계의 운동에 영향을 미치지 않게 된다. 그러나 이 경우 인과 분면에서 수레와 추를 하나의 계로 설정해야 하는데 A2 유형의 참여자들은 수레만을 계로 설정함으로써 타당한 모형 생성에 실패한 것으로도 해석할 수 있다.

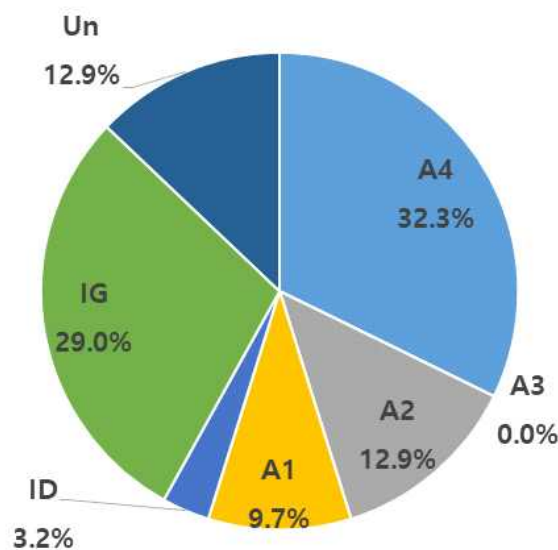
[표 4-8] 7번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	1, 4, 8, 9, 10, 11, 13, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 29, 30, 32	수레와 추를 별도의 계로 설정한 상태에서 추의 중력을 수레의 상호작용으로 오인하고 상호작용과 인과 분면을 구성함
	23	상호작용 분면에서 장력과 추에 작용하는 중력의 크기가 같다고 오함
IG	7, 12, 24, 31	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

8) 8번 문항

8번 문항의 상황은 대체로 7번과 동일하나 수레에 마찰력이 존재한다는 것에서 차이를 보인다. 또한 7번 문항에서는 수레나 추의 운동에 관한 논의를 유도하지 않았으나 8번 문항에서는 추의 속도에 관한 상태 분면을 구성해야 한다는 점도 차별되는 부분이다.

[그림 4-21]에 8번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 8번 문항에서는 A4, A2의 비중은 작은 편인데 반해 IG의 비중은 거의 30%에 육박한 것으로 보아 참여자들이 모형을 구성하기가 상당히 까다로운 문항으로 나타났다.



[그림 4-21] 8번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-9]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 8번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. A2와 A1 유형 참가자들은 대부분 마찰력을 고려하지 않고 7번 문항과 유사하게 인과 분면을 구성하였다. 이는 참여자들이 마찰력을 식별하지 못했거나 고려하지 않고 상호작용 분면을 구성했기 때문으로 보인다. 일부 참여자는 수와 추를 별개의 계로 설정한 뒤 마찰력을 인과 분면 구성에 적용하지 않았다. 마찰력은 테이블(동인)과

수레(대상)의 상호작용으로 수레만을 계로 설정하면 계 외부의 상호작용이 된다. 그럼에도 일부 참여자들은 마찰력을 포함하지 않고 수레의 인과 분면을 구성하였다. 이는 참여자들이 계의 구성 원리에 대한 명확한 기준을 갖고 있지 않으며 계의 설정을 모형구성 과정에서 일관성 있게 적용하지 못하는 것으로 해석할 수 있다. 또한 상호작용이 작용하는 대상(수레)과 문제 상황에서 기술을 요하는 대상(추)의 불일치로 인해 학생들이 계를 설정하는데 어려움을 겪고 직관이나 추측에 의해 해를 선택한 경우가 많았다. 정리하면, 많은 참여자들이 복수의 대상에 관한 모형을 구성할 때 계 설정에 따라 외부와 내부의 상호작용을 구분하고 이를 일관성 있게 적용하여 하는데 어려움을 겪고 있음을 확인할 수 있었다.

[표 4-9] 8번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

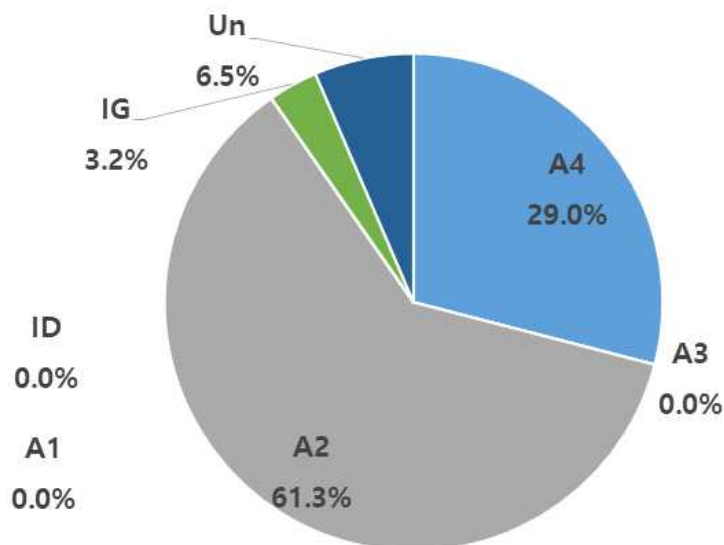
모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	10, 17, 31	마찰력을 고려하지 않고 상호작용 분면과 인과 분면을 구성하여 가속도를 구한 다음 속도에 관한 상태 분면을 구성함
	24	마찰력의 크기를 오인하고 상호작용 분면을 구성함.
A1	13, 20	마찰력을 고려하지 않고 상호작용 분면과 인과 분면을 구성함. 속도에 관한 상태 분면은 구성하지 못함
ID	29	임의적으로 운동 2법칙에 변인을 대입하여 해를 추정함
IG	8, 2, 11, 12, 16, 19, 22, 26, 27, 30	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

9) 9번 문항

9번 문항은 힘개념 검사(Hestenes *et al.*, 1992)의 문제 상황을 차용하여 제작한 것으로 상태 분면보다는 상호작용 분면에 초점이 맞춰진 문항

이다. 5번, 6번 문항과 유사하게 문항의 제시문에서 물체에 작용하는 상호작용을 명시적으로 드러내지 않았으며 참여자들이 물체의 운동 상태를 통해 상호작용을 유추해야 한다.

[그림 4-22]에 9번 문항의 모형구성 유형 분포를 제시하였다. 9번 문항의 모형구성 유형 분포는 매우 독특하다. A2 참여자들이 전체 문항 중에서 가장 비중이 크며 A1로 분류된 참여자는 한 명도 없었다. 이는 9번 문제 상황이 상태보다는 상호작용 기술자 중심으로 기술되기 때문에 상호작용 기술자를 타당하게 식별하면 나머지 분면을 구성하는 것은 그리 어렵지 않았던 것으로 해석된다. ID나 IG 유형은 1명에 불과하여 대부분의 참여자들이 비록 타당하지는 않지만 모든 분면을 형성하는데 성공한 것으로 보인다.



[그림 4-22] 9번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-10]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 9번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. 9번 문항에서 A2 유형의 참여자들은 소형차와 지면 사이의 정지마찰력이 소형차의 구동력임을 인지하지 못한 채 소형차가 트럭을 미는 힘을 트럭과 소형차에 가해지고 있는 외력으로 혼동하

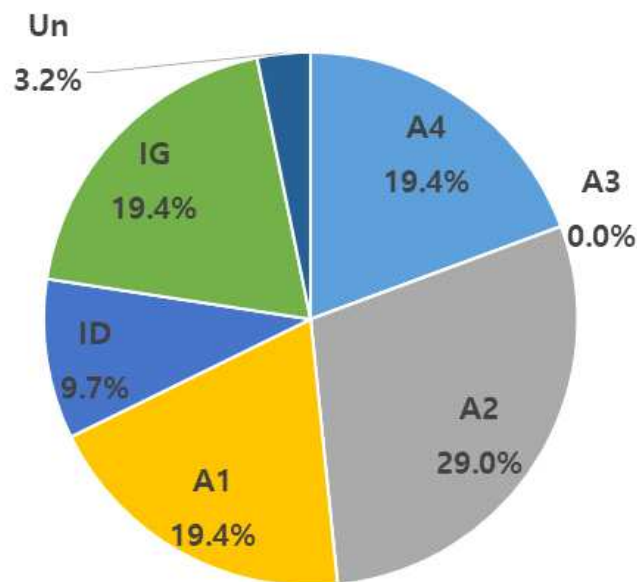
였다. 문항 제시문에서 소형차의 구동력이 지면과의 정지마찰력이라는 점을 명시적으로 표현하지 않았으므로 참여자들은 소형차와 트럭의 운동 상태를 통해 이를 유추했어야 했다. 즉, 소형차가 트럭을 미는 힘은 소형차와 트럭 간의 상호작용이므로 소형차는 외부 동인과의 상호작용이 존재해야만 소형차와 트럭이 함께 가속 운동을 할 수 있다. 여기서의 동인은 바로 지면과의 마찰력이다. 물리 I 에서 자동차의 구동 원리를 다루지 않았기에 참여자들에게 이러한 접근은 쉽지 않은 일이다. 그러나 구동력에 관한 구체적인 지식이나 개념이 없다하더라도 알짜힘 혹은 작용 반작용과 같은 상호작용 기술자 간의 관계를 통해 인과 분면의 구성은 가능하다. 그러나 많은 참여자들이 상호작용에 관한 개념 세계의 요소들을 활용하여 타당한 모형 생성에 성공하지 못하였다. 9번 문항에서 참여자들은 힘이란 물리적 실체간의 상호작용임을 명확히 이해하지 못하고 있으며 명시적으로 제시하지 않은 상호작용을 식별하고 모형을 구성하는데 어려움을 겪고 있음을 확인하였다.

[표 4-10] 9번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	10, 17, 31	마찰력을 고려하지 않고 상호작용 분면과 인과 분면을 구성하여 가속도를 구한 다음 속도에 관한 상태 분면을 구성함
	24	마찰력의 크기를 오인하고 상호작용 분면을 구성함.
A1	13, 20	마찰력을 고려하지 않고 상호작용 분면과 인과 분면을 구성함. 속도에 관한 상태 분면은 구성하지 못함
ID	29	임의적으로 운동2법칙에 변인을 대입하여 해를 추정함
IG	8, 2, 11, 12, 16, 19, 22, 26, 27, 30	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함
10) 10번 문항		

10번 문항은 줄로 연결된 두 대상이 일정한 속도로 움직이고 있는 상태에서 서로를 잡아당기는 상황이다. 두 대상 간의 상호작용은 계 내부의 힘이므로 계의 운동 상태에 영향을 주지 않는다. 따라서 두 대상을 하나의 계로 설정하면 관성기준계로 볼 수 있으므로 대상들의 초기 상태를 지면을 기준으로 정지한 상태로 전환하여 모형을 구성해도 무방하다. 또한 문항의 제시문에서는 한 대상이 일방적으로 다른 대상을 잡아당기는 것으로 묘사되었으나 참여자들은 작용반작용을 통해 두 대상에게 모두 장력이 작용하고 있음을 인지해야 한다.

[그림 4-23]에 10번 문항의 모형구성 유형 분포를 제시하였다. 10번 문항은 전체 문항 중에서 3번 문항 다음으로 A4의 비율이 낮은 문항으로 특정 유형에 학생들이 쏠려 있지 않고 고른 분포를 보이고 있다. 또한 정답률이 22.6%로 전체 문항에서 가장 어려운 문항으로 나타났다.



[그림 4-23] 10번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-11]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 10번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. A2 유형의 참여자들은 영희가 철수를 당기는 힘의 반작용을 인식하지 않고 철수만 영희에게 끌려오는 것으로 문제

상황을 이해하여 모형을 생성하였다. 작용반작용에 대한 개념을 문제 상황에 투사하여 영희에 작용하는 상호작용을 식별하지 못하고 소박한 직관에 의거하여 문제 상황의 기술자를 인식한 것으로 보인다. 또한 두 대상이 등속직선 운동하고 있는 상태에서 상호작용을 하고 있다는 점도 참여자들의 상태 분면 형성의 어려움을 가중시켰다. 두 대상을 하나의 계로 본다면 계 내부에서 대상간의 상대적은 운동은 계 전체의 운동에 영향을 주지 않기 때문에 영희와 철수의 초기 운동 상태는 상태 분면 구성에 영향을 주지 않을 수 있다. 그러나 이러한 계의 운동에 관한 적절한 이해가 뒷받침되지 않는다면 이는 문제 상황을 복잡하게 인식하는 원인이 된다. 결론적으로 10번 문항은 상호작용 기술자에 대한 부적절한 인식과 운동 상태의 복잡성, 복수의 대상에 대한 기술 등의 요인으로 인해 학생들이 타당한 모형을 구성하는데 어려움을 겪은 것으로 해석할 수 있다.

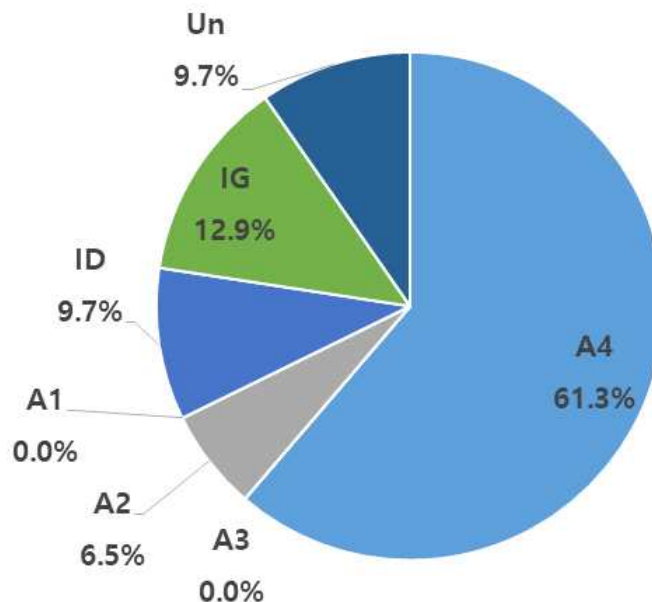
[표 4-11] 10번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	1, 4, 10, 13, 21, 23, 25	영희에게 작용하는 알짜힘이 0이라고 오인하고 철수에 대한 분면만을 구성함
	24	계 내부의 상호작용을 외부의 상호작용으로 오인하여 인과 분면과 상태 분면을 구성함
	20	영희의 인과 분면만을 구성하였으며 두 사람 간의 상대 속도를 고려하지 않고 상태 분면을 구성함
A1	9, 27, 30	상호작용 분면과 인과 분면은 적절하게 구성했으나 상태 분면을 구성하지 못함
	11, 18	영희와 철수의 상호작용으로 계 전체의 인과 분면을 구성하였으며, 상태 분면은 구성하지 못함
	31	철수에 대한 상호작용과 인과 분면만을 구성하고 상태 분면은 구성하지 못함
ID	19, 29	충격에 의한 운동 모형에 임의로 변입을 대입하여 나온 결과를 해로 간주
	32	두 물체의 이동 거리를 임의적인 방법으로 구하여 가장 근접한 보기를 선택함
IG	8, 15, 22, 26	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

11) 11번 문항

11번 문항은 이전 문항들과 달리 대상의 운동 상태가 등속이나 등가속도 운동이 아니라 가속도가 일정하게 변하는 운동으로 제시되어 있다. 즉, 11번 문항의 모형을 구성하기 위해서는 등가속도나 등속직선 운동 모형 대신에 충격에 의한 운동 모형이 선택되어야 한다. 개념 모형의 선택이 적절하게 이뤄졌다면 상태 분면은 방향을 고려한 운동량의 변화량으로 표현되게 된다. 즉, 11번 문항에 대한 모형구성의 핵심은 문제 상황의 특정 유형 즉, 가속도 운동 상황에 대한 인지를 바탕으로 충격에 의한 운동 모형을 선택하는 단계라 할 수 있다.

[그림 4-24]에 11번 문항의 모형구성 유형 분포를 제시하였다. 11번 문항은 상대적으로 A2의 비율이 낮고 IG와 ID의 비율은 높은 것으로 나타났다. 이는 적절한 개념 모형을 선택한 참여자들의 대부분은 타당한 모형을 생성하였으나 그렇지 못한 참여자들은 하나의 분면도 구성하기 버거워한 것으로 해석할 수 있다.



[그림 4-24] 11번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-12]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 11번 문항 모형구성에서

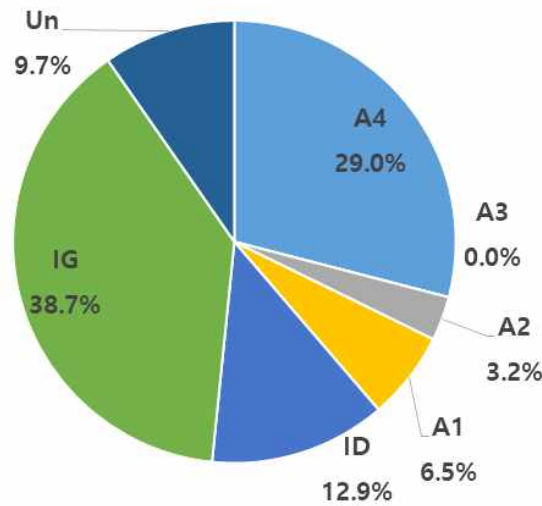
겪은 어려움을 기술하였다. A2 유형의 참여자들은 적합한 개념 모형을 선택했음에도 운동량의 변화량을 구하는 과정에서 방향에 따른 부호의 설정에서 어려움을 노출하였다. ID 유형의 참여자들은 문제 상황에 대한 숙고 없이 익숙한 등가속도 운동 모형을 적용하여 모형을 구성하고자 한 것으로 나타났다. 이는 Halloun(2006)이 지적한 바와 같이 ID나 IG 유형의 참여자들은 선택한 개념 모형과 문제 상황간의 동형성(isomorphism)에 대한 충분한 숙고가 없었거나 충격에 의한 운동 모형에 대한 지식이나 이해가 현저히 부족한 것으로 해석할 수 있다.

[표 4-12] 11번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	11, 18	상태 분면에서 운동량을 구하는데 있어 벡터의 방향이 적절하지 않음
ID	23, 24, 25	운동 2법칙에 임의로 변인을 대입하여 해를 구함
IG	20, 22, 26, 30, 23, 24, 25	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

12) 12번 문항

12번 문항은 11번 문항과 마찬가지로 가속도가 일정하지 않은 물체의 운동을 다루고 있으나 대상에 브레이크가 작동하기 전까지는 자유 낙하에 의한 등가속도 운동을 한다는 점에서 복합적인 운동 상황으로 설계되어 있다. 따라서 12번 문항의 모형을 구성하기 위해서 복수의 개념 모형을 선택해야 하므로 12번 문항은 전체 문항 중에서 모형구성이 가장 복잡한 문항이라 할 수 있다. 이러한 문제 상황의 복잡성과 난해함으로 인해 12번 문항은 전체 문항 중에서 A4+A3+A2의 비율이 가장 낮으며 ID+IG의 비율은 가장 높게 나타났다[그림 4-25].



[그림 4-25] 12번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-13]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 12번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. ID로 분류된 참여자 대부분은 등가속도 운동 모형과 운동량-충격량 모형을 시간에 따라서 구분하여 적용하지 않고 임의적으로 혼용하여 변입을 대입하였다. 또한 IG에 해당되는 학생들의 대다수도 11번 문항에서의 동료교수를 통해 그래프의 면적이 충격량이라는 지식은 접했으나 충격량과 운동량 사이의 개념적 관계에 대해서는 충분한 이해에 도달하지 못해 모형을 생성하지 못한 것으로 보인다. 결과적으로 가속도 운동이라는 다소 익숙하지 않은 상황과 더불어 특정 사건을 기준으로 다른 개념 모형을 선택해야 한다는 점들로 인해 학생들이 분면 구성에 어려움을 겪은 것으로 해석된다.

[표 4-13] 12번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	21	상호작용 분면에서 알짜힘에 의한 충격량을 타당하게 구성하지 못함
A1	17	충격량을 계산하여 속도의 변화량을 구했으나 등가속도 운동 구간에 대한 상태 분면을 구성하지 못함
	25	인과 분면 즉, 알짜힘에 의한 충격량만 계산함
ID	23, 27, 29	충격량과 등가속도 운동 관련 공식에 변인을 대입한 결과를 임의적으로 조합하여 해를 구함
	28	문제에서 주어진 그래프를 임의적으로 적분하여 물체가 낙하한 거리를 구하고자 하였음
IG	7, 11, 13, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 30, 31, 32	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

앞에서의 논의 중에서 모형구성에서 학생들의 어려움에 해당되는 내용만을 [표 4-14]에 요약하였다.

[표 4-14] 각 문항별 모형구성의 어려움

문 항	모형구성 유형 (빈도별 상위 4개)	문항별 모형구성의 어려움
1	A4 52%	·참여자들이 등가속도 운동과 관련된 개념 세계를 적절하게 상기하지 못해 개념 모형의 선택이나 상태 분면 구성에 어려움을 겪음
	IG 19%	
	A1 13%	
	Un 10%	
2	A4 42%	·A2와 A1 유형의 참여자들은 주로 상태 분면에서 서로 다른 유형의 운동을 하는 두 물체의 상태를 하나의 좌표계에서 표현하는데 있어 어려움을 겪음
	A2 29%	
	A1 13%	
	IG 7%	
3	A2 55%	·대부분의 A2는 문제에서 기술하기를 요구하는 운동 시점을 다른 시점과 혼동하여 상태 분면을 구성함
	A4 16%	
	A1 13%	
	IG 7%	

4	A4	55%	·A2로 분류된 대부분의 참여자들은 벽까지의 거리를 자동차가 이동한 거리를 오인하여 상태 분면을 구성
	A2	16%	
	IG	13%	
	A1	7%	
5	A4	65%	·A2와 A1 참여자들은 등속 운동하는 물체에 대한 오개념 혹은 마찰력에 관한 지식 부족으로 인해 상호작용 기술자를 타당하게 인식하지 못함. 이로 인해 등가속도 운동 모형을 개념 모형을 선택하지 못하였으며 모형 생성에 어려움을 겪음
	A2	13%	
	IG	13%	
	Un	6%	
6	A1	58%	·A1의 비율이 가장 높게 나타난 문항으로 대부분의 참여자들이 상태 분면을 구성하지 못함 ·A2와 A1에 속한 많은 참여자들이 마찰력을 고려하지 않고 철수가 카트를 미는 힘을 알짜힘으로 오인함 ·A1 참여자들은 상태 분면에서 시간을 매개하지 않고 이동거리와 속도를 관련짓는데 어려움을 나타냄
	A4	29%	
	A2	7%	
	Un	6%	
7	A2	58%	·A2 참여자들의 대부분 상호작용 분면에서는 수레와 추에 작용하는 장력을 인지하지 못하고 추의 중력을 수레에 작용하는 상호작용으로 오인함 ·위 어려움은 계의 설정이 기술자 식별부터 모형 생성에 이르기까지 일관성 있게 유지되지 못함으로 해석할 수도 있음
	A4	23%	
	IG	13%	
	Un	6%	
8	A4	32%	·A2와 A1에 속한 참여자들은 상호작용 기술자(마찰력)에 대한 타당한 기술없이 7번 문항의 모형을 수정하지 않고 차용하여 모형을 생성함. ·마찰력이 작용하는 대상과 문제 상황에서 기술을 요하는 대상의 불일치로 인해 참여자들이 모형을 구성에서 어려움을 겪고 직관이나 추측에 의해 해를 선택함 ·복수의 대상에 관한 모형을 구성할 때 계 설정에 따라 외부와 내부의 상호작용을 구분하고 이를 일관성 있게 적용하여 하는데 어려움을 겪고 있음
	IG	29%	
	A2	13%	
	Uni	13%	
9	A2	61%	·상태 분면에 관한 수학적 조작이 없어 상태 분면 구성에 관한 어려움을 관찰되지 않음 ·A2에 속한 참여자들의 대부분은 대상과 동인의 구분을 통한 계의 설정과 어떤 상호작용을 인과 분면에 적용할 지에 대해서 어려움을 느낌 ·명시적으로 제시하지 않은 자동차의 타이어와 도로 사이의 정지 마찰력에 대해서 인지한 참여자가 거의 없음
	A4	29%	
	Un	7%	
	IG	3%	
10	A2	29%	·A2 참여자들은 영희가 철수를 당기는 힘의 반작용을 철수만 영희에게 끌려오는 것으로 문제 상황을 기술하여 분
	A4	20%	

11	A1	19%	면을 구성
	IG	19%	·A1 유형의 참여자들은 상태 분면 구성에서 두 대상의 운동을 한 좌표계에서 기술하는데 어려움을 겪음
	A4	61%	·가속도 운동 상황에 적합한 개념 모형을 선택하지 못한
	IG	13%	참여자들의 비율이 높음
	ID	10%	·충격량-운동량 개념 모형을 선택한 참여자들은 대부분
12	Un	10%	모형 분면을 타당하게 구성함
	IG	39%	·복합적인 운동 상황을 기술하기 위해 2개의 개념 모형을
	A4	29%	선택해야 하나 많은 참여자들이 그 중 한 개만을 선택함
	ID	13%	·IG나 ID 유형의 참여자들은 두 개념 모형을 적용하는
	Un	10%	시점의 상태 기술자 식별이 명확히 구분되지 않아 임의적인 방식으로 두 개념 모형을 혼용함

모형구성에 관한 참여자들의 어려움을 모형구성의 각 단계를 중심으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

기술자 식별에서 참여자들의 어려움은 크게 두 가지 측면으로 나타났다. 첫 번째는 문제 상황에 대한 오인이다. 문제의 제시문을 주의 깊게 읽지 않아 문제 상황의 특정 조건이나(6번) 기술해야 하는 대상의 운동 시점 혹은 거리(3번, 4번)등을 오인하였다. 두 번째 측면은 상호작용 기술자의 인식이다. 특히 명시적으로 상호작용 기술자를 제시하지 않은 문항에서 참여자들은 대상의 운동 상태나 초기 조건 등을 이용하여 상호작용 기술자를 인식해야 한다(5번, 6번, 7번, 9번). 이때 전통적인 오개념이 상호작용 기술자 식별에 중요 장애로 작용하여 상호작용 분면 구성에 직접적인 영향을 끼친 것으로 나타났다. 이 경우 참여자들은 상태 기술자에 대한 인과적인 분석을 통해 상호작용 기술자를 추론하기 보다는 상태와 상호작용을 혼동하거나 상호작용이 존재하지 않는 것으로 간주하기도 하였다. 또한 대상 간에 상호작용이 있는 경우 한 대상에게만 힘이 작용한다고 인식하는 경우도 관찰되었다(10번).

일부 참여자들은 개념 모형을 선택할 때 문제 상황과 개념 모형간의 동질성(isomorphism)에 대한 충분한 숙고 없이 익숙한 개념 모형을 선택하는 경우가 관찰되었다(11번, 12번). 이는 참여자들이 대상 혹은 계의

기술자가 개념 모형 선택의 중요한 기준임을 이해하지 못했거나 개념 모형에 관한 이해와 지식이 충분하지 못했던 것으로 해석할 수 있다.

모형 생성 단계에서 참여자들은 계의 설정, 즉 대상과 동인의 구분에 대한 명확한 기준을 갖고 있지 않아 어떤 상호작용 기술자를 인과 분면 구성에 적용할 것인가에 대해 혼란스러워했다(7번, 8번, 9번, 10번). 또한 기술자 식별부터 모형 생성 단계에 이르기까지 계의 구성을 일관성 있게 유지하지 않고 각 단계마다 계의 설정을 달리 하는 모습도 확인할 수 있었다.

모형 생성 단계의 또 다른 어려움은 상태 분면이었다. 이는 다른 분면들에 비해 상태 분면은 구성하는 과정에서 요구되는 개념 도식이 많기 때문으로 보인다. 또한 연구 참여자들은 문제 상황에서 복수의 대상이 존재하거나 문제 상황의 특정 유형이 복합적일 때 상태 분면의 구성을 어려워하는 것으로 나타났다. 운동 상태가 다른 두 물체 간의 거리를 한 좌표축계에서 표현하거나(2번, 10번), 복수의 대상에 대한 모형을 필요로 하거나(7번, 8번), 대상의 운동 상황이 복합적일 때(3번)일 때 A2, A1 유형의 참여자들은 상태 분면 구성에서 어려움을 겪었다.

타당화 단계에서는 참여자들은 자신의 해가 보기에 있는지 여부가 모형의 타당성을 평가하는데 일차적인 기준임을 확인하였다. 3번, 7번, 9번, 10번 문항의 경우 A2 유형이 비율이 유독 높게 나타났는데 이는 타당하지 않은 모형의 해가 보기에 있으면 연구 참여자들은 생성된 모형이 타당하다고 판단한 것으로 해석할 수 있다. 자신들의 해가 보기에 없는 경우 연구 참여자들은 자신의 모형을 포기하고 적당해 보이는 보기를 임의로 선택하거나 모형을 재검토하여 수정하였다.

4.2. 소집단 상호작용의 양상

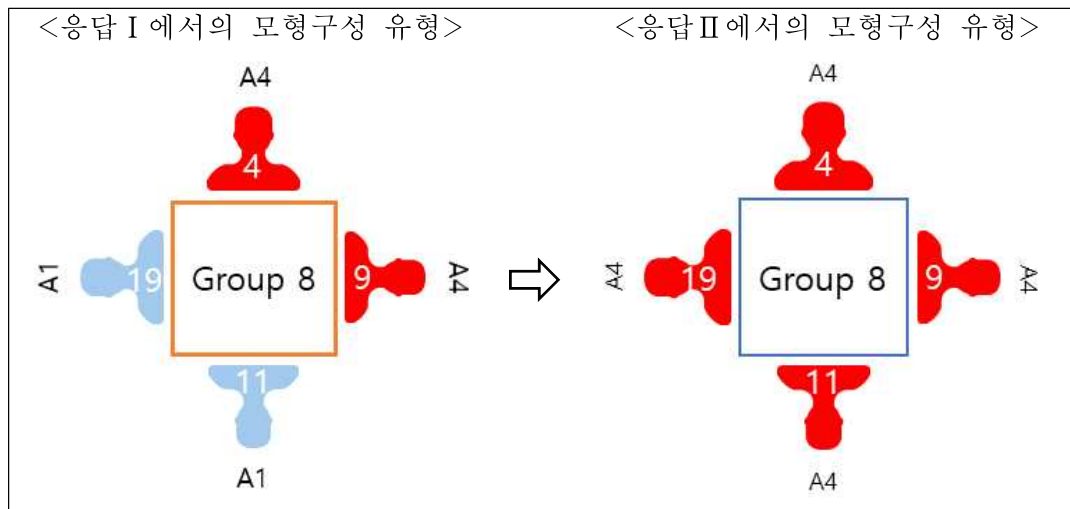
이 절에서는 문제해결에 관한 동료교수에서 모둠원들이 상호작용하는 양상을 모둠 내 대응된 모형의 수, 참여자들의 역할, 선택된 개념 모형의 동질성, 모형의 변화 등을 기준으로 범주화하였다. 그 결과 참여자들의 소집단 상호작용은 튜터링, 경쟁, 협업, 양립성 확인의 4가지 양상으로 분류되었다. 그리고 전체 문항에 대한 소집단 상호작용 양상의 빈도를 제시하고 비슷한 분포를 보이는 문항들의 특징을 분석하였다.

4.2.1. 소집단 상호작용의 양상 분류

참여자들은 응답 I 이 끝나면 교사가 지정한 모둠으로 이동하여 모둠원들과 동료 토론을 수행하였다. 이때 참여자들이 나눈 담화와 활동지, 제출한 답안 등을 분석하여 참여자들의 소집단 상호작용을 다음과 같이 튜터링, 경쟁, 협업, 양립성 확인의 네 가지 양상으로 분류하였다.

1) 튜터링

본 연구에서 가장 많이 관찰된 상호작용은 교수자(tutor) 역할을 맡은 참여자가 주로 설명을 하며 상호작용을 주도하는 형태였다. 피교수자(tutee)는 교수자의 모형이 타당함을 암묵적으로 혹은 명시적으로 판단한 뒤 그들의 모형을 수용한다. 이러한 양상이 관찰된 6번 문항 8조에서의 참여자들의 모형구성 유형의 변화를 [그림 4-26]에 나타냈다. 붉은 색은 정답을 하늘색은 오답을 의미한다.



[그림 4-26] 6번 문항 8조의 모형구성 유형 변화(튜터링)

응답 I 에서 대응된 모형을 구성한 참여자는 S4, S9로 이들은 타당한 모형을 구성하여 정확한 해를 구하였다. 반면 S11, S19는 A1 유형으로 일부 분면만을 구성하였으며 정확한 해를 구하지 못하였다. 이들 중 모듬의 소집단 상호작용을 주도한 것은 S4와 S19였다. 다음은 6번 문항 8조에 관한 참여자들의 담화이다.

S19: D야? 어떻게 나왔냐?

S4 : 그니까 아까 전 상황이 마찰력이 5N 있었잖아. 근데 지금 10N으로 증가했잖아. 그럼 5N(마찰력)이 미는 건 있어. 그럼 아까처럼 계산해보면은 가속도 $1/4$ 나오는 거 맞고, $1/4$ 로 밀면 이 그래프가(본인 학습지를 가리키며) 나오잖아. 근데 이만큼 8m를 이동했잖아. 8m를 이동했을 때 속도를 구해야 돼. 그래서 이거 사다리꼴 공식 쓰면 좀 XX같이 나오거든? 여기서 근의 공식 써가지고 하면은 이렇게 나와. 이제 이 식에 대입해주면? 이제 더 깔끔하게 나와

S19: (끄덕끄덕) 사다리꼴에서? v-t 그래프에서 그렇게 한 거야?

S4 : 어 v-t 그래프

S19: 처음속도 뭐로 잡아놨냐?

S4 : 1. 처음에 1m/s였잖아.

S19: 아아~ 1m/s로 이동.

S4 : 응

S19: (9번 학습지를 보며)어떻게 했냐?

S9: (4번을 가리키며) 나도 똑같아 애랑...가속도 구해서 v-t 그래프

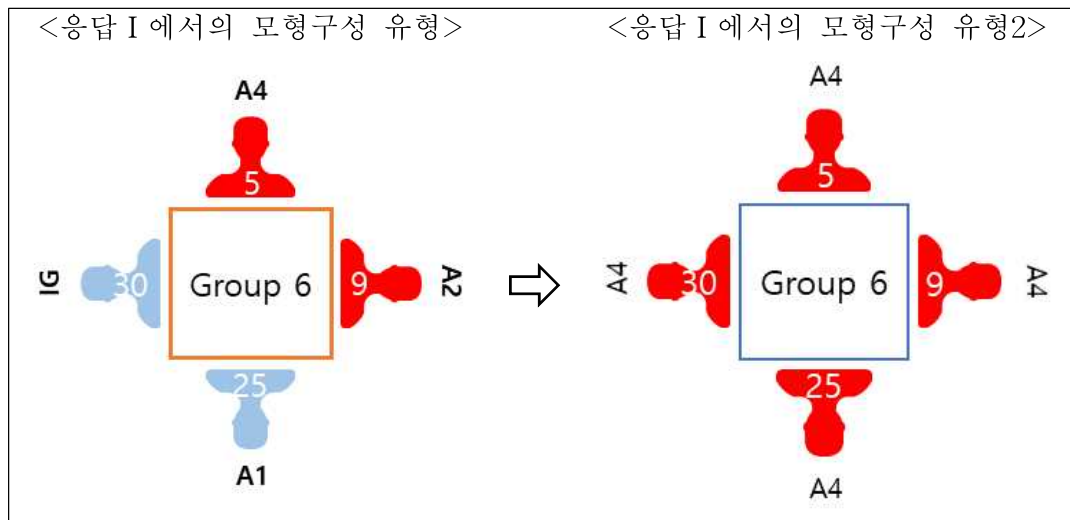
(잠시 후)

S19: 아~ $\sqrt{5} m/s$ 딱 나오네.

대응된 모형을 구성하지 못한 S19는 담화 초기에 대응된 모형을 구성했다고 짐작되는 S4에게 설명을 요구하고 있다. S4는 담화 내내 교수자의 입장에서 피교수자인 S19에게 자신의 모형을 설명하고 있다. 본 연구에서는 참여자들이 교수자와 피교수자의 역할을 수행하며 교수자로부터 피교수자에게 일방적인 모형의 전수가 일어나는 소집단 상호작용을 튜터링으로 분류하였다. 튜터링에서 참여자들의 역할은 고정적이며 동등하지 않다는 특성(Damon & Phelps, 1989)을 보이고 있다.

2) 경쟁

대응된 모형을 가진 참여자가 모둠 내에서 복수일 때 모둠원들은 어떤 모형이 가장 적합한 것인가에 대해 평가를 실시한다. 먼저 대응된 모형을 구성한 참여자들이 자신의 모형을 설명하면 모둠원들은 각자의 방식대로 서로의 모형을 비교, 평가를 실시한다. 평가 결과가 일치하면 모둠원들은 가장 적합하다고 판단된 모형으로 합의를 한다. 만약 평가 결과가 일치하지 않는다면 모둠원은 각기 다른 모형을 고수하게 된다. 이러한 유형이 관찰된 3번 문항 6조에서의 참여자들의 모형구성 유형의 변화를 [그림 4-27]에 나타냈다.



[그림 4-27] 3번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(경쟁-합의)

이 모둠에서 대응된 모형을 가진 참여자는 S5와 S9이다. 이 둘 모두 정답을 선택하기는 했으나 타당한 모형을 구성한 이는 S5였다. 이 모듬의 담화 초반부에서 S5와 S9의 모형에 대한 비교와 평가가 이뤄졌다.

S5: 그니까 브레이크를 밟을 때 $10m/s^2$ 만큼 감소. 가속도 그래프를 그렸어. $10m/s$ 가 되려면 2초 필요하지. $10m/s$ 로 지나가려면. 그럼 그때 넓이가 이 넓이 이 사다리꼴 넓이가 40이야. 그니까 브레이크를 밟아서 $10m/s$ 까지 감소를 하는데 40m를 가야 돼. 그니까 100m지 원래 길이가. 100에 40을 빼. 그럼 60m를 그냥 가도 된다는 거 아니야? .30m/s 지 원래 속도가... 30인데 60m를 가려면 2초 동안은 그냥 가도 된다는 거야. 2초 동안은 그냥 보고 있어도 돼

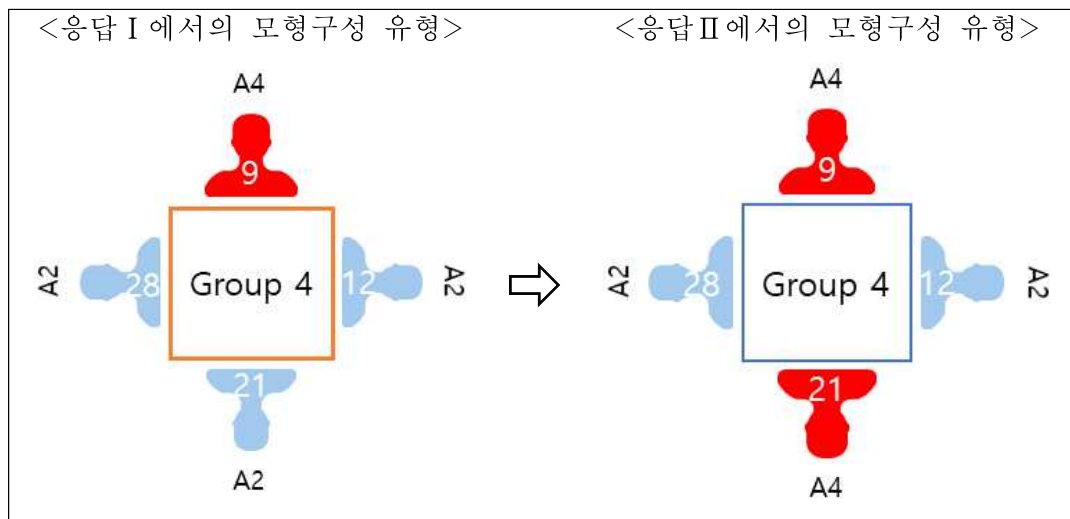
S9: (학습지를 보며)그냥 속력이 이렇게 지날 때 $10m/s$ 가 되면 되니까. 1초에 10씩 떨어지니까 2초 전에만 밟으면 $10m/s$ 로 지나가는 거 아니야? 굳이 이거 전 길이를 계산을 해야 돼?

S5: 뭘 소리야?

S9: 그니까 어차피 초당 10씩 떨어지잖아. 속력이 근데. 이 전체 조건이 그냥 이거 지날 때 $10m/s$ 만 지나면 통과잖아. 그니까

어차피 2초 전에만 하면은 뒤에 거리는 상관없는 거 아니야?
 (중략)
 S5: 근데 네가 말한 대로 하면...
 S9: 나는 이것을 도착하기 몇초 전에 밟아야 되는 지로 잘못 썼어.
 S5: 아~ 그거 아니지 않아?
 S9: 원래 이거 100m에서 해야 되는데 어찌다가 답은 맞았는데... 문제 이해를 잘못된 거 같아.

위 담화는 S5와 S9가 각자의 모형을 제시하고 비교하는 과정을 보여주고 있다. 비교 과정이 끝나고 S9는 자신이 구성한 상태 분면의 문제점을 발견하고는 S5의 모형이 타당하다고 합의하였다. 본 연구에서는 상이한 모형을 구성한 참여자들이 각자의 모형을 비교, 평가하여 적합하다고 여겨지는 모형을 선택하는 양상을 경쟁으로 분류하였다. 모형의 선택은 위 사례와 같이 더욱 타당하다고 판단되는 모형으로 합의가 이뤄질 수도 있지만 그렇지 않을 수도 있다. [그림 4-28]은 합의에 도달하지 못한 채 각자 다른 모형을 선택한 9번 문항 4조의 모형구성 유형의 변화이다.



[그림 4-28] 9번 문항 4조의 모형구성 유형 변화(경쟁-고수)

이 모듈의 모든 참여자들은 대응된 모형을 구성한 상태로 담화를 시작

하였다. 담화를 시작하기 전 타당한 모형을 구성한 참여자는 S9였다.

S9 : $F=ma$ 로 따지고 애(소형차)는 가속도가 5니까 5000N이지?
애(트럭)는 10,000N이고. 근데 애(트럭)는 힘이 없잖아. 애
(소형차)가 애(트럭)를 밀어주는 거잖아. 밀어주는 힘이
10,000N이니까. 작용반작용에 의해서 반대쪽 힘도 10,000N.
그래가지고.

S28: 근데 왜 나는 애초에 그냥 차가 이렇게 운동하니까. 애(소형
차)가 처음에 15,000N, 15,000N의 힘을 줘가지고 이렇게 움
직이는 거니까. 트럭도 애(소형차)를 15000N을 밀어서 움
직이는 줄 알았어. 아닌가?

S12: 그렇게 따지는 거 아니야?

S21: 아니야. 아니야.

S28: 그러니까 처음에 트럭을 밀 때 애(소형차)가 가속도를 많이
줘가지고 15000N의 힘으로 미니까.

S9 : 근데 15,000N을 미는 거는. 밀고 반대가 아니라 앞으로 이동
을 하는 거 아니야?

S21: 그니까 이거 질량만 F 를 나눠서 가지니까 애(소형차) 알짜
힘이 5,000N이고 애 알짜힘이 10,000N 이니깐.

S12: 나는 상쇄되어서 5,000N인 것 같은데.

S21: 어, C(10,000N)같은데? 애(소형차)가 처음에 15,000N으로 밀
었는데. 애(트럭) 알짜힘이 이것만 남은 거니까. 이쪽으로
애(트럭)가 10,000N을, 10,000N쪽으로 힘을 밀었을 거니까.
10,000N 같은데?

(중략).

S21: 난 아무리 봐도 C같은데?

S12: 난 너무 B같은데.

S28: 난 아무리 봐도 D야. 맞아 이게. 15000으로 미니까 같이 이
렇게 딱 가는 거지

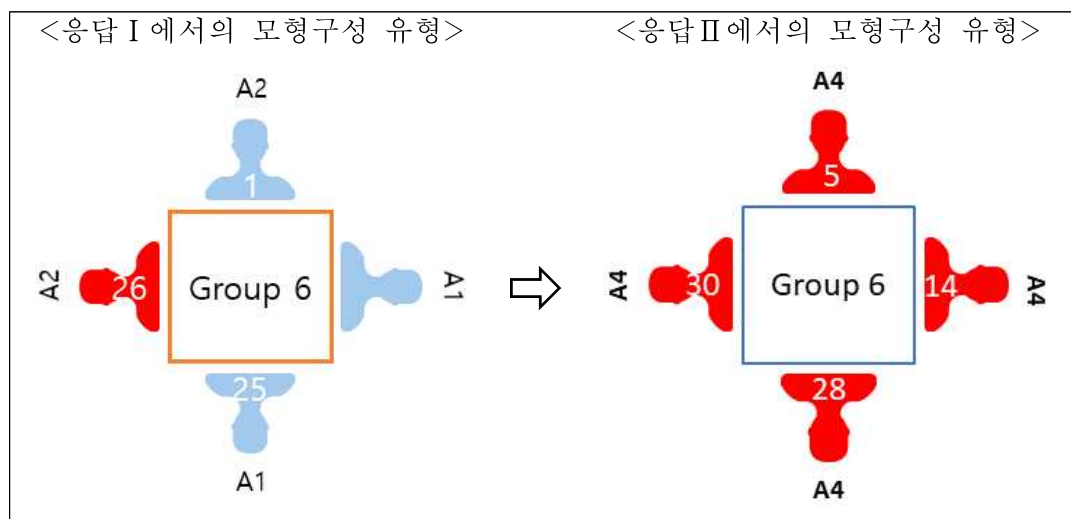
9번 문항 4조의 참여자들은 이전 사례와 달리 끝내 어떤 모듈원의 모
형이 적합한지에 합의하지 않았다. S21은 S9의 모형이 타당하다고 생각

하고 선택하였으나 다른 이들은 수레와 트럭의 상호작용에 대한 이견을 좁히지 못하고 각자의 모형을 끝까지 고수하고 있다.

이처럼 경쟁은 서로 다른 모형을 생성한 참여자들이 각자 대등한 위치에서 상호작용에 능동적으로 참여하는 특징이 관찰된다.

3) 협업

모둠원 중 대응된 모형을 구성한 참여자가 없거나 대응된 모형이 기각된 경우에 참여자들은 공동으로 모형을 수정하거나 새로운 모형의 구성을 시도한다. [그림 4-29]은 이러한 유형이 관찰된 6번 문항 6조의 모형 구성 유형의 변화이다.



[그림 4-29] 6번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(협업)

이 모듬의 S26은 정답을 선택하였으나 임의적으로 답을 선택한 결과였으며 대응된 모형을 구성한 참여자는 없었다.

S26: 나 $\sqrt{8}m/s$ 나왔는데. 찍었다니깐. 나 풀었는데 풀 때마다 $\sqrt{8}m/s$ 나와.

S25: 가속도 $0.5m/s^2$ 맞지 않나...?

S23: 그러면 가속도가 일단 $0.5m/s^2$ 이고

S26: $0.5m/s^2$ 인데 내가 그래프를 그렸거든?

S23: 나도 그렇게 했어.

(중략)

S23: 그니까 $4\sqrt{2}$ 나왔어. 난 t 가.

S26: 그니까 $4\sqrt{2}$ 가. 나도 나와 가지고. v 가 $2\sqrt{2}m/s$ 나왔어.

S23: 거기까지는 우리가 틀린 건 아닌 거 같아.

S26: 거기에서 틀렸으니까 틀린 거 아닐까?

S23: 아니지 이걸 맞는데 우리가 뭘 잘못된 거지.

(중략)

S23: 설마 이거냐?(활동지를 가리키며) 설마 이게 포인트는 아니겠지?

S25: 아 근데 이거(힘) 증가시키니까. 여기서 $10N$ 이라고 했으니까 똑같으니까 딱 가는 거 아닌가? 가속도가 $0.5m/s^2$ 인데.

S23: 아 5번 문제 초기 상황이었네 이게..(학습지를 넘기며)이거 이거...

S1 : 아 E번 나온다..마찰력 계산하면 E번 나와.

S25: 답이 무엇으로 나왔어?

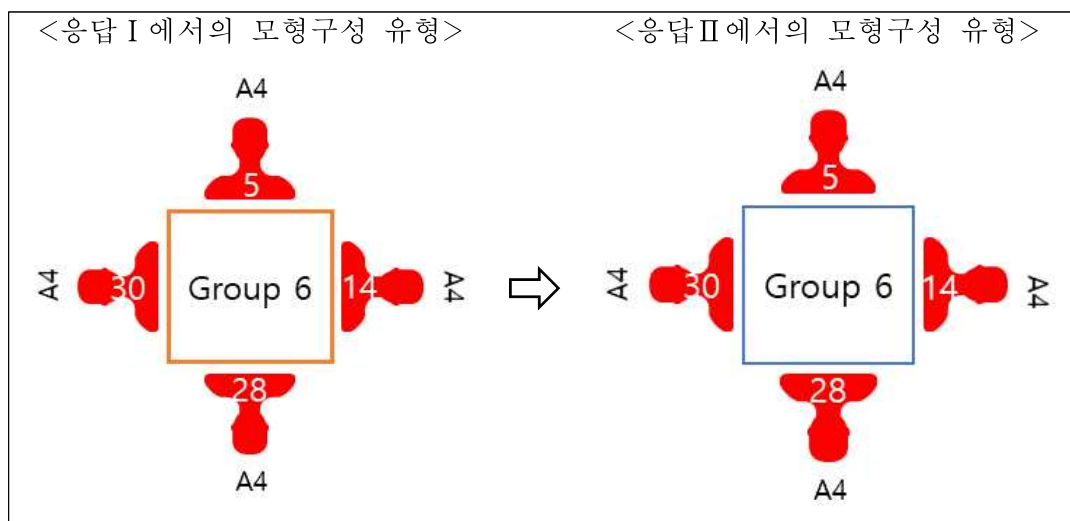
S1 : $\sqrt{5}m/s$ 나와 마찰력 계산하면.. 마찰력까지 계산하면. 이게 가속도가 $1/4m/s^2$ 이 되거든..

S25: 마찰력이 있었어...몰랐어..왜 이상하더라...

위 사례에서 참여자들은 모두 상호작용 분면에서 카트에 작용하는 마찰력을 인지하지 못하고 있다. 대표적으로 S26은 마찰력을 고려하지 않은 상태에서 상태 분면을 구성하여 해를 도출했으나 보기에 해가 없었다. S26은 자신의 모형이 틀렸음을 깨닫고 이를 수정하고자 하였으나 마찰력을 인지하지 못해 어려움을 겪었다. 잠시 후 S23이 문제 상황에서 참여자들이 놓친 부분을 지적하자 S1이 이내 마찰력을 적용하여 타당한 모형을 생성하게 된다. 이렇게 참여자들이 문제 상황 인식과 모형에 관한 정보를 공유함으로써 공동으로 모형을 수정하거나 새로운 모형의 구성을 시도하는 양상을 협업으로 분류하였다.

4) 양립성 확인

양립성 확인에서는 대응된 모형을 구성한 참여자들이 모형들을 비교하여 모형의 유사성과 차이점을 확인한다. 이때 참여자들은 경쟁을 통한 합의보다는 다른 이의 모형이 타당함을 암묵적으로 인정한 뒤 어떤 측면이 자신의 모형과 다른지 대조한다. [그림 4-30]은 이러한 양상이 관찰된 6번 문항 6조의 모형구성 유형의 변화이다.



[그림 4-30] 1번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(양립성 확인)

1번 문항 6조는 모든 모둠원이 타당한 모형을 구성한 사례이다. 이들은 모두가 답이 같다는 것을 확인한 뒤 각자의 모형에 대해 설명한다.

S28: 답이 다 똑같은데?

S30: 다 똑같아?

(중략)

S28: 역학적 에너지 그걸로 했는데, 떨어지기 전에는 mgh 고 지면에 닿을 때 에너지는 $\frac{1}{2}mv^2$ 인데 높이가 두 배가 되면 속도는 $\sqrt{2}$ 배가 되거든? 그래 가지고 가속도는 일정한데 속도

는 시간에 비례하니까. $\sqrt{2}$ 초.

S14: 나는 일단 하나는 그래프로 했고 하나는 평균속도로 했거든? 둘 다 결과적으로 똑같은 방법인데. 속도는 0초에서 10t까지 가니까 둘이 더해서 반 나누면 $5t$ 잖아. $5t^2$ 하고.. 그래서 그걸 거기를 10으로 하면은, t^2 은 2 나오니까. $t = \sqrt{2}$.

S30: 아~

S5 : 어쨌든 속도 시간 그래프를 그리면 아래 면적이 h 일 거 아니야? 첫 번째 실험에서 근데 그 때 $t=1$ 이니까 이번에는 2 h 높이에서 떨어트리면 넓이가 두 배가 되는 거 아니야? 삼각형을 잘 이용하면 당연히 각 변의 길이가 $\sqrt{2}$ 배가 될 수 밖에 없어.

S30 : 나도 애랑(5번) 풀이과정이 같아. 그래프 그려서 했어

위 참여자들은 개념 모형과 모형의 표상 측면에서 다른 모형을 구성했다고 볼 수 있다. 다른 참여자들이 등가속도 운동 모형을 선택한 것과 달리 S28은 중력장에서의 역학적 에너지 보존 모형을 선택하여 다른 구조의 모형을 구성하였다. 또한 S14는 상태 분면에서 대상의 이동거리를 기술하는데 있어 S5와 S30과 달리 평균 속도 개념을 활용하여 수학적 조작에서 계산의 용이함을 추구하였다. 이처럼 대응된 모형을 구성한 참여자들이 각자 구성한 모형들의 유사성과 차이점을 확인하는 소집단 상호작용을 양립성 확인으로 분류하였다.

위에서 분류한 소집단 상호작용의 양상을 [표 4-15]에서 정리하고 조세부 설명을 기술하였다.

[표 4-15] 소집단 상호작용의 양상

유형	설명
튜터링	대응된 모형을 구성한 교수자가 대응된 모형을 구성하지 못한 피교수자에게 자신의 모형을 설명하고 피교수자는 이를 수용
경쟁	모형의 구조가 다른 대응된 모형을 구성한 복수의 참여자들이 서로의 모형을 비교/평가를 통해 합의를 시도함. 평가 결과가 상이한 경우 합의에 도달하지 못하고 자신의 모형을 고수.
협업	모둠에 대응된 모형이 없거나 모형이 중도에 기각된 경우 참여자들이 모형을 공동구성하기 위해 협업
양립성 확인	대응된 모형을 구성한 참여자들이 모형들을 비교하여 유사성과 차이점을 확인

4.2.2 문항별 소집단 상호작용 양상 빈도

문항별 소집단 상호작용 양상의 빈도를 [표 4-16]에 제시하였다. 소집단 상호작용의 분석 단위를 문항에 대한 모둠별 담화로 설정하여 한 모둠의 담화를 1개의 상호작용으로 분류하였다. 그러나 한 문항에 복수의 소집단 상호작용 양상이 관찰되는 경우도 있어 관찰된 상호작용의 총 빈도수는 118건이었다. 예를 들어 한 모둠에서 담화의 전반부는 A4와 A2 유형 간의 경쟁으로 분류가 되었으나 후반부에서 ID나 IG 유형과 A4 유형 간에 튜터링이 관찰되기도 하였다.

[표 4-16] 소집단 상호작용 양상의 빈도(N=118)

	튜터링	경쟁	협업	양립성 확인
1번 문항	6	0	0	4
2번 문항	4	0	2	3
3번 문항	5	2	1	2
4번 문항	5	2	0	4
5번 문항	5	1	0	3
6번 문항	7	0	1	1
7번 문항	5	5	0	1
8번 문항	8	0	2	1
9번 문항	2	7	1	0
10번 문항	6	3	2	0
11번 문항	6	1	0	2
12번 문항	5	0	3	0
합계	64(54.2%)	21(17.8%)	12(10.1%)	21(17.8%)

전체 소집단 상호작용 중에서 가장 빈번하게 관찰된 양상은 튜터링으로 전체의 54.2%를 차지하였다. 반면 협업은 가장 적게 관찰된 양상으로 전체의 10.1%에 불과하였다. 비록 제한적인 결과이기는 하나 물리 문제 해결에 관한 동료교수에서 참여자들은 가장 적합하다고 판단되는 모형을 구성한 참여자의 모형을 일방적으로 수용하는 형태의 소집단 상호작용이 가장 빈번한 것으로 확인되었다. 이는 비유 모델에 기반하여 소집단 설명모형의 발달을 관찰한 선행 연구(이신영 외, 2012)에서 학생들의 개별적인 모형이 융합된 정교형(elaborated) 유형이 가장 많이 것과는 다른 결과이다. 튜터링은 7번과 9번을 제외하고 모든 문항에서 5회 이상 관찰되었으므로 동료교수 맥락에서 벌어지는 소집단 상호작용의 주된 양상이

라 할 수 있다.

경쟁의 비중은 17.8%에 불과하였으나 7번과 9번 문항 비중이 유독 높게 나타났다. 7번과 9번 문항의 공통점은 모형구성 유형에서 A2의 비중이 매우 높았다는 점이다. 7번의 A2 비중은 62%, 9번의 A2 비중은 66%였다. 즉, 7번과 9번은 모두 내에 대응된 모형의 비중이 매우 높았으며 자연스럽게 다른 문항보다 경쟁의 빈도가 높아진 것으로 보인다. 즉, A2 유형이 많은 문항의 경우 참여자들은 수동적으로 다른 참여자의 모형을 받아들이기보다 비교/평가를 통해 능동적으로 모형을 선택하려는 경향이 두드러진다고 판단된다. 7번과 9번에서 유독 A2 비중이 큰 이유를 모형구성의 어려움과 연관 지어 이해할 수 있다. 4.1.2.절에서 참여자들은 7번과 9번에서 상호작용 기술자의 인식과 계의 설정에 어려움을 겪고 있음을 논의하였다. 이 두 가지 어려움이 복합적으로 나타나는 문항에서 참여자들은 자신의 모형구성에서 어떤 문제점이 있는지 자발적으로 파악하지 못하고 소집단 상호작용한다. 반면 A2 모형의 비중이 높았던 또 다른 3번 문항에서는 경쟁의 빈도가 그다지 높은 편이 아니었다. 3번 문항의 경우는 문제 상황의 단순 오인이 모형구성의 주된 어려움이였다. 따라서 3번 문항에서는 A2 유형의 참여자들은 A4의 모형을 접하는 것만으로 문제 상황의 오인을 인지하고 경쟁에 참여하지 않은 것으로 보인다.

협업의 빈도가 가장 높았던 문항은 12번이다. 12번 문항은 $A4+A3+A2$ 의 비율은 가장 낮고 $ID+IG$ 의 비율은 가장 높은 문항이었다. 이는 4.1.1.에서 언급한 바와 같이 12번 문항은 등가속도 운동 모형뿐만이 아니라 충격에 의한 운동 모형도 함께 적용하여 해결이 가능한 복잡한 문제 상황으로 구성되어 있기 때문이다. 가속도가 변하는 다소 익숙하지 않은 운동 상태와 더불어 특정 사건을 기준으로 다른 개념 모형을 선택해야 한다는 점들로 인해 많은 참여자들이 분면을 구성하지 못하였다. 구조적으로 완성된 모형이 존재하지 않을 경우 참여자들은 특정 개인에 의존하지 않고 적극적으로 협업하여 문제를 함께 해결하고자 하는 경향을 확인할 수 있다.

양립성 확인은 전체에서 17.8%만을 차지하였으나 응답 I 에서 정답률이 50% 이상이었던 문항에서는 상대적으로 비중이 높았다. 이는 교실응답시스템에서 참여자들의 모둠을 지정할 때 정답률이 50% 이상이면 한 모둠에 정답자를 몰아서 배치하는 경향이 있었기 때문이다. 물론 정답이 A4 유형을 의미하는 것은 아니지만 정답을 제출한 참여자가 A4일 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서 양립성 확인의 빈도는 경쟁과 협업처럼 문항의 특성보다는 모둠의 편성이 더욱 큰 영향을 미친 것으로 보인다.

4.3. 소집단 상호작용이 모형구성에 미치는 영향

앞 절에서 논의한 바와 같이 참여자들의 역할이나 대응된 모형의 존재 여부, 모형의 변화 등에 따라 소집단 상호작용의 양상은 다르게 나타났다. 본 절에서는 소집단 상호작용에서 나타나는 모형구성 요소의 상호작용과 이로 인한 모형구성의 변화를 사례 분석함으로써 소집단 상호작용이 참여자의 모형구성에 어떠한 영향을 미치고 있는지 기술하고자 한다.

4.3.1. 튜터링

튜터링에서 참여자들은 그 역할이 교수자(tutor)와 피교수자(tutee)로 명확히 구분되어 상호작용에 참여한다. 이때 참여자들의 상호작용은 교수자가 자신의 모형을 설명하고 피교수자가 이를 이해하여 수용하는 방식으로 이루어진다. 피교수가 응답 I 에서 어떤 유형의 모형을 구성했는지, 소집단 상호작용에 얼마나 능동적으로 참여하는 지에 따라 튜터링의 양상은 달라진다.

1) A4와 A2, A1 유형 간의 튜터링

먼저 피교수자가 A2나 A1 유형에 속하는 경우이다. 4.1.2.에서 논의한 대로 이 유형의 피교수자들은 대개 상호작용 기술자를 타당하게 인식하지 못했거나 상태 분면을 구성하는데 어려움을 겪은 경우가 많다. A2나 A1 유형에 속하는 피교수자들은 교수자와 모형과 문제 상황 인식에 대해 상호작용함으로써 모형구성에서 자신의 문제점을 파악하고 이를 수정할 수 있다. 또한 이러한 과정에서 타당하지 않은 모형구성의 원인이 되

는 개념 세계의 모순 혹은 결핍과 대면할 수 있게 된다.

1)에서는 7번 문항을 중심으로 튜터링에 대한 사례 분석을 진행하고자 한다. 다음의 7번 문항 7조 S15(A4)와 S18(A2)의 담화를 통해 튜터링이 A2와 A1 유형 참여자들의 모형구성에 어떠한 영향을 미치는지 구체적으로 논의하겠다

S15: 이거가 추가 하나당 1kg니까. 추가 x개니까 $x\text{kg}$ 일거 아니야. 그러면 애(추)한테 가해지는 힘이 $10x$ 일거 아냐. 그치? 근데 수레랑 추랑 합치면 $(x+2)\text{kg}$ 이잖아. 질량이 $(x+2)\text{kg}$ 인데.

S18: 근데 왜 추까지 더해야해?

S15: 이거랑 이거랑 달리 해야지. 힘이 10이니까 이게 나누면 5가 되지? 그래서 거길 계산하면 2. 2개.

(중략)

S18: 근데 이 추의 무게까지 더해서 생각해야해?

S4: 당연하지. 물체계인데.

S18: 물체계니까? 그래도 난 기억이 안 나는데.

S15: 그게 애 혼자 내려가는 게 아니잖아. 애를 끌고 가잖아. 그니까 이걸 같이 생각해줘야지 하나로. 아 그니까 이걸 네가 추를 위에 올려놓고 추를 아래로 떨어뜨린다고 생각해서 모르는 건데. 애(추)를 이렇게 올려가지고.

S18: 어. 막대로 민다고 생각하면?

S15: 중력가속도로 이렇게 당긴다고 생각하는 게 편해.

S18: 그렇네.

S15: 이렇게 전체가 딱 하나로 해가지고 $x+2$ 짜리 물체 하나고. 이것을 $10x$ 의 힘으로 당기고 있는 거야.

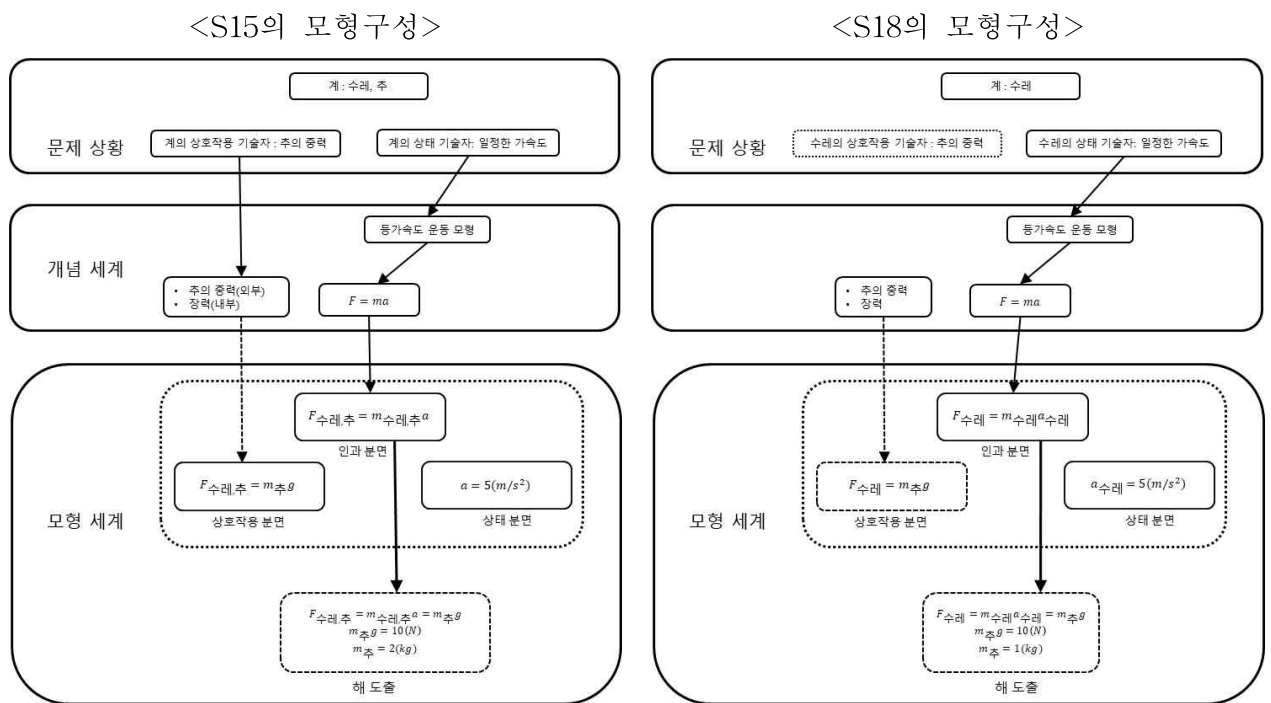
S18: 그러면 애(추)도 가속도가 5인거야?

S15: 다 같은 가속도를 받잖아 그래서.

S18: 그렇네.

S15: 근데 하나 물체가 5m/s^2 으로 이동한다 생각하면 돼.

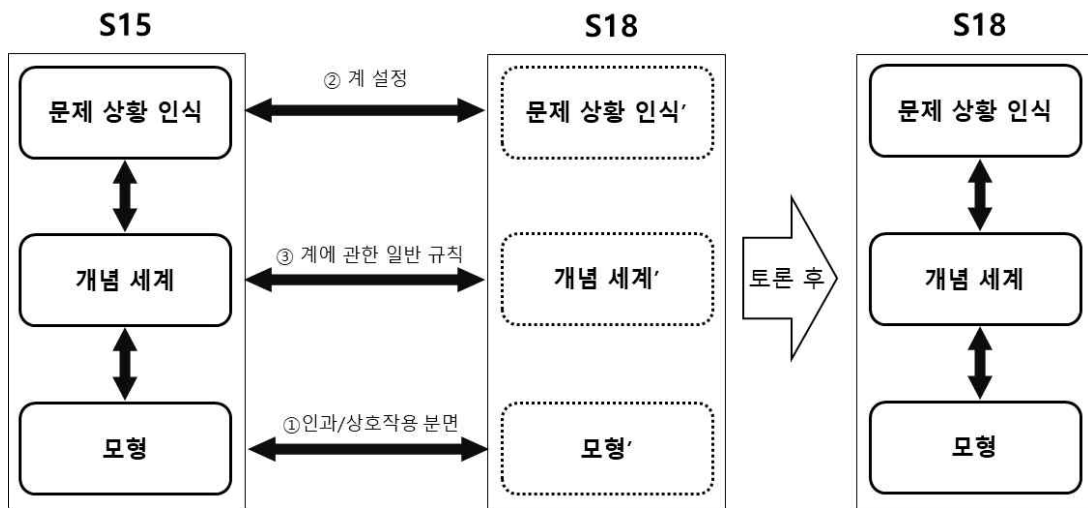
위 담화에서 피교수자인 S18은 A2 유형으로 인과 분면에서 수레만을 계로 설정하였음에도 추의 중력을 계에 작용하는 상호작용 기술자로 인식하고 상호작용 분면을 형성하였다. 이로 인해 두 분면 사이의 계 설정이 내적 일관성을 갖추지 못하였다. 반면 교수자인 S15는 수레와 추를 계로 설정하여 추의 중력을 계 외부 상호작용으로 인식하고 이를 일관성 있게 다른 분면에도 적용하여 모형을 생성하였다[그림 4-31].



[그림 4-31] 튜터링에 참여한 교수자와 피교수자(A2)의 모형구성 비교

[그림 4-32]에 S15와 S18의 모형구성 요소 간의 상호작용을 도식화하였다. 도식에서 각 모형구성 요소는 모서리가 둥근 직사각으로 표현하였으며 물리적으로 타당하면 실선, 타당하지 않으면 점선으로 표시하였다. S15는 담화 초기에 각 분면과 수학적 조작 과정을 직접적으로 제시하였다. 이를 접한 S18은 S15와 자신의 모형을 비교한 뒤 인과 분면에서 질량이 다르게 설정된 점을 파악하고 왜 수레와 추의 질량을 더해야 하는지에 대한, 즉 계의 설정에 관한 질문을 한다(①). S15는 수레와 추와 실

로 연결되어 있으므로 하나의 계로 볼 수 있으며 추의 중력이 계에 작용하는 외력임을 설명한다(②). S15의 설명은 계의 설정과 상호작용 기술자 식별에 관한 것이지만 이 과정에서 자연스럽게 계에 관한 일반 규칙을 언급하고 있다. 즉, S15는 물체계라는 용어를 통해 복수의 대상을 계로 묶어서 모형을 구성하는 계에 관한 일반 규칙을 설명하고 있는 것이다 (③).



[그림 4-32] 튜터링에 참여한 S15와 S18의 상호작용과 모형구성 변화

S15와 S18의 사례는 튜터링에서 모형구성 요소의 상호작용이 어떻게 피교수자의 모형구성에 기여하는지를 잘 보여주는 사례이다. 위 사례에서 모형구성 요소 중 가장 먼저 명시적으로 드러나는 것은 모형의 상호작용이다. 담화 초기에 S15는 자신의 모형 분면과 수학적 조작을 설명하였고 S18은 이를 자신의 모형과 비교하여 차이점을 인지하고 있다. 그리고 계 설정과 기술자 식별에 관한 문제 상황의 상호작용이 관찰되었다. 이러한 순서가 절대적인 것은 아니며 다른 튜터링 사례에서는 문제 상황 인식의 상호작용이 먼저 일어나고 모형의 상호작용이 뒤를 잇기도 하였다. 상호작용이 일어나는 순서보다 주목해야 할 점은 튜터링에서 모형과 문제 상황 인식의 상호작용이 명시적으로 관찰된다는 것이다. 이를 통해 피교수자는 교수자의 문제 상황 인식과 모형을 접함으로써 자신의 모형

구성의 문제점을 인식하고 이를 수정할 수 있게 된다. 위 사례에서 S18은 자신이 구성한 모형의 인과 분면과 S15의 인과 분면의 상이함이 계 설정에서 기인했음을 알게 되었다.

그러나 인지적인 측면에서 더욱 의미 있는 것은 바로 개념 세계의 상호작용이다. 위 사례에서 S18이 타당하지 않은 모형을 구성한 이유는 단순한 실수나 문제 상황에 대한 오인 탓이 아니다. 계의 일반 규칙에 관한 개념적인 결핍이 있었기 때문이다. S18은 담화 초기에 인과 분면에서 왜 추의 질량을 더 해야 하는지 질문을 하였다. 추의 중력은 엄밀히 수레라는 대상에 작용하는 상호작용이 아니며 추와 수레를 동일한 계로 설정했을 시에만 계에 영향을 주는 외부 상호작용이 될 수 있다. 모형은 계에 대한 설명 체계를 구성하는 것이므로 계의 설정은 모든 분면에서 일관성 있게 설정되어야 한다. 즉, S18은 뉴턴 역학의 계에 관한 일반 규칙에 대해 인지하지 못하고 있었던 것이다. S15는 S18에게 자신이 왜 수레와 추를 하나의 계로 보고 있으며 추의 중력은 수레가 아니라 계에 작용하는 상호작용임을 분명히 설명하고 있다. 이 과정에서 피교수자인 S18은 계의 설정에 관한 개념 세계의 결핍을 대면하고 이를 보완할 기회를 얻게 되었다. S18에게서 개념 세계의 보완이 있었다는 근거로 8번 문항에서 S18의 모형구성을 제시하고자 한다. 마찰력이 있다는 것만 제외하면 8번 문항은 7번 문항과 계의 설정과 선택되어야 하는 개념 모형이 거의 같다. S18은 S15에게 배운 계의 설정을 8번 문항에 적용하여 타당한 모형을 생성함으로써 7번 문항에서의 튜터링이 피상적인 모형의 수용이 아닌 개념 세계의 발달에 기여할 수 있음을 보여주고 있다.

위 사례에서 교수자와 피교수자 간의 개념 세계 상호작용을 이끌어낸 것은 피교수자인 S18의 적극적인 질문과 교수자인 S15의 적절한 설명이다. S18은 뉴턴 역학의 계에 관한 일반 규칙에 대해 인지하지 못하고 있었으며 S15의 모형을 통해 이와 관련된 개념 세계의 결핍을 대면하게 되었다. S15는 S18에게 자신의 모형에서 계가 어떻게 설정되었고 그렇게 할 수 있는 근거를 설명하는 과정에서 계에 관한 일반 규칙에 대해서 언

급하였다. 만약 S18이 이에 대해 적극적으로 질문하지 않았다면 S15은 위와 같은 심도 있는 설명을 하지 않고 자신의 모형에 대한 설명만으로 담화를 끝냈을 것이다. 따라서 개념 세계의 상호작용은 피교수자의 질문에서부터 시작되며 교수자의 적절한 설명이 뒷받침됨으로써 피교수자의 모형구성에 의미 있게 기여한다고 볼 수 있다.

그러나 튜터링에서 개념 세계간의 상호작용이 명시적으로 관찰되는 것은 아니다. 7번 문항의 경우 피교수자 8명 중에서 3명에게서만 개념 세계의 상호작용이 일어났으며 나머지 5명에게는 개념 세계의 상호작용은 확인되지 않았다. 따라서 A2와 A1 유형을 대상으로 하는 튜터링에서는 개념 세계 상호작용 없이 모형과 문제 상황 인식의 상호작용도 빈번하다는 것을 알 수 있다. 다음은 개념 세계의 상호작용이 없이 모형과 문제 상황 인식의 상호작용만이 관찰된 7번 문항 1조의 S17(A4)과 S20(A2), S22(A2)의 담화이다.

S17: 이게 추의 개수인데 N개로 봤어 왜냐면 이거 하나에 1kg이라서 N이라서 Nkg인거잖아 N개면, 근데 이제 여기서 중력 가속도가 $10m/s^2$ 이면 여기 밑으로 가해지는 힘이 10N이지?

S20: 그렇지.

S17: 그러면 이제, 가속도가 $5m/s^2$ 이면 이거랑 이거랑 가속도가 같은데. 그때 가속도가 $5m/s^2$ 이라는 거잖아, 그러면 이제 N플러스 2이고...이게 2kg이고 이게 Nkg이니까. 가속도 5에다가, 이게 가속도 5이고 이게 질량 두개 합친 게 (N+2)이잖아. 그럼 이제 (N+2)*5=10N이라고 생각하는 거야.

S20: 그렇지.

S17: 그렇게 하면 10N은 이렇게 나오고 N은 2야.

S20: (활동지를 가리키면서)아 이게 맞아 가속도가 이렇게 같을 수도 있구나.

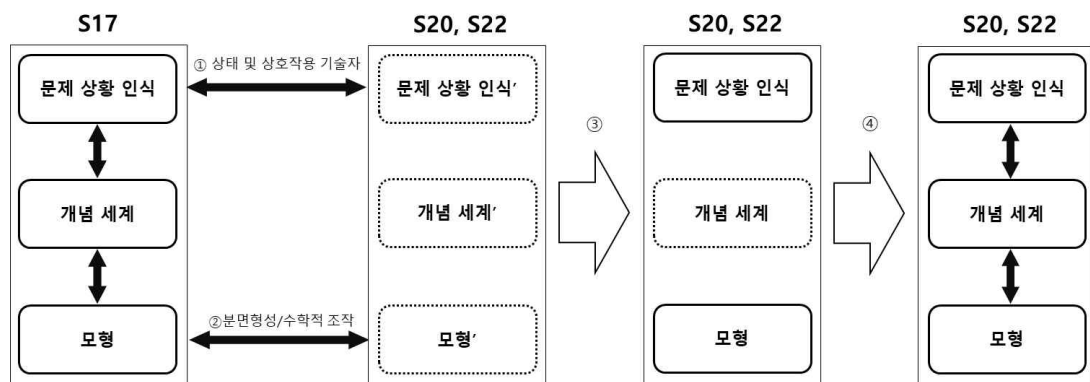
S22: (20번 활동지를 가리키면서)왜 N+2지?

S20: 가해지는 힘이 아래로 10N만큼 가잖아. 근데 그 무게가 추

N개에다가 2 더한 거. 이렇게

S17: 말 잘하네.

위 사례에서 S17은 교수자, S20과 S22는 피교수자로서 소집단 상호작용에 참여하였다. S17은 이전 사례의 S15와 S20과 S22는 S18과 동일한 모형을 구성한 상태였다. [그림 4-33]에 모형구성 요소의 상호작용을 도식화하였다. 모형구성 요소를 연결하는 화살표의 실선은 요소간의 일관성이 있음을, 점선은 그렇지 못한 것을 의미한다.



[그림 4-33] 튜터링에 참여한 S17과 S20, S22의 상호작용과 모형구성 변화

담화 초기에 S17이 추에 작용하는 상호작용 기술자와 계 전체의 상태 기술자에 대해 설명하면서 문제 상황 인식의 상호작용이 일어나고 있다 (①). 곧 이어 분면 형성에 관한 S17의 설명이 이어지며 모형 간의 상호작용이 관찰된다(②). 1조를 이전 사례 7조와 비교해보면 상호작용이 일어나는 순서는 다르지만 모형과 문제 상황 인식의 상호작용이 명시적으로 드러났다는 점이 동일하다. 흥미로운 부분은 1조도 7조와 마찬가지로 피교수자인 S22가 인과 분면에서 추의 질량을 더하는 것에 대해 질문을 했다는 점이다. S22는 자신이 구성한 모형과 S17이 구성한 모형의 차이점을 인식하고 이에 관해서 질문을 하였다. S20이 교수자를 대신하여 이에 대해 설명하였으나 수식을 언어적으로 풀어서 재진술한 것에 불과하

며 왜 더하는 것인가에 대한 이론적인 설명을 제공하지 않았다. S22 역시 이 부분에 관한 개념 세계의 결핍을 보완하기 위해 적극적으로 추가적인 질문을 하지 않아 결과적으로 개념 세계의 상호작용이 일어나지 않았다. 명시적으로 관찰된 부분만 놓고 본다면 S20과 S22은 소집단 상호작용을 통해 교수자인 S17의 문제 상황 인식과 모형만을 수용한 것으로 확인된다(③). 그러나 교수자와의 개념 세계간 상호작용이 관찰되지 않았으므로 개념 세계의 보완은 피교수자가 수정된 문제 상황 인식과 모형을 일관성 있게 연결하는 과정에서 자발적으로 일어나는 수밖에 없다(④). 만약 자발적으로 개념 세계의 보완이 일어나지 않았다면 S20과 S22는 자신의 개념 세계와 모순되는 모형을 생성한 것이므로 수용된 모형의 설명력(viability)은 담보되지 않으며 7번 문항의 모형은 다른 문제 상황을 구성하기 위한 새로운 개념 세계의 요소가 되기 어려울 것이다.

7번 문항 1조의 사례만으로 피교수자인 S20과 S22가 [그림 4-33]의 ④ 과정을 거쳐 자발적으로 개념 세계를 보완했는지를 직접적으로 확인할 수 없었다. 다만 7번과 문제 상황이 유사한 8번 문항에서의 모형구성에 이를 간접적으로 가늠해볼 수 있다. 8번 문항은 수레에 작용하는 마찰력을 제외하면 7번 문항과 계의 설정과 선택되는 개념 모형이 거의 동일하다. 8번 문항에서 모형구성 유형은 S20이 A1, S22가 IG로 분류되었다. 1조의 사례에서 담화 후반부 교수자 역할까지 하며 상호작용에 적극적으로 참여한 S20은 8번 문항에서 계에 작용하는 상호작용에 수레의 무게를 포함하는 것을 보아 7번 문항에서 계의 구성에 관한 명확한 개념 세계 보완이 일어나지 않은 것으로 해석되었다. 뿐만 아니라 S22는 오히려 8번 문항에서 어떤 모형의 분면도 형성하지 못하였다. 이는 앞의 사례에서 S18이 8번 문항에서 타당한 모형을 구성한 것과는 대조적인 결과이다. 따라서 [그림 4-33]의 ④과 같은 개념 세계의 자발적인 보완은 S20과 S22에게서 일어나지 않은 것으로 해석할 수 있다.

7번 문항의 1조와 7조 사례를 통해 A1과 A2유형에 대한 튜터링에서 피교수자는 교수자와의 문제 상황 인식과 모형의 명시적인 상호작용을

통해 자신의 모형구성의 문제점을 인지하고 이를 수정함을 확인하였다. 그러나 이 과정에서 개념 세계의 상호작용은 제한적으로 일어나며 개념 세계의 상호작용이 일어나지 않은 경우 피교수자는 수정된 모형과 자신의 개념 세계 사이의 일관성 있는 연결을 통해 자발적으로 개념 세계를 수정해야 한다. 그렇지 못한 경우 수용된 모형은 설명력을 지니지 못할 개연성이 크며, 소집단 상호작용이 참여자들의 개념 세계를 확장하는데 기여하기는 어려울 것이다. 7번 문항에서 개념 세계의 상호작용이 관찰되지 않은 A2유형의 피교수자는 모두 4명이었으며 이 중에서 8번 문항에서 타당한 모형을 구성한 참여자는 1명에 불과하고 나머지 3명은 A1, IG, Un 등으로 분류되었다. 이러한 결과는 개념 세계의 명시적인 상호작용 없이 피교수자가 동료의 모형을 수용하여 자발적으로 개념 세계의 결핍이나 모순을 자발적으로 보완하는 것이 매우 어려운 인지적 과정임을 나타낸다.

위 논의를 정리하면, A2와 A1 유형의 참여자들을 피교수자로 하는 튜터링에서 피교수자들은 교수자의 모형과 문제 상황 인식을 수용하는 과정을 통해 자신이 구성한 모형구성의 문제점을 인지하고 이를 수정하는 것으로 나타났다. 그러나 타당하지 않은 모형구성의 원인이 단순한 수학적 조작의 실수나 문제 상황에 대한 오인이 아니라 개념 세계의 결핍이나 모순에서 기인하는 경우 개념 세계의 보완은 제한적으로 일어나는 것으로 확인되었다. 피교수자의 적극적인 질문과 교수자의 적절한 설명을 통해 개념 세계의 상호작용이 유도되면 개념 세계의 결핍이 보완되고 피교수자는 일관된 모형구성에 성공하였다. 반면 개념 세계에 대한 직접적인 상호작용이 유도되지 않으면 피교수자가 모형과 문제 상황을 일관성 있게 연결하는 과정에서 자발적으로 개념 세계의 결핍을 보완해야 하며 본 연구에서 제시한 7번 문항의 사례에서 이는 성공적이지 못했다. 이 경우에 피교수자들은 자신의 개념 세계와 모형 사이의 모순을 인지하지 못한 채 단지 결과적인 모형만을 수용한 것으로 해석되었다.

2) A4 - ID, IG 유형 간의 튜터링

앞에서 논의한 튜터링이 A2 혹은 A1과 같이 모형의 분면을 부분적으로나마 구성한 참여자들에 관한 것이었다면 이번에는 ID와 IG 유형의 참여를 대상으로 하는 튜터링이 모형구성에 기여하는 바를 기술하고자 한다. 이 두 유형의 참여자들은 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 분면을 구성하지 못했으므로 소집단 상호작용은 일방적일 가능성이 크다. 다음은 이와 관련된 3번 문항 8조 S10(A4)과 S8(ID)의 담화이다.

S10: 최대정지 마찰력이 10,000N까지 가잖아.

S8 : 어.

S10: $F=ma$. 자동차 질량이 10kg이니까. 애가 브레이크를 짹 밟으면 그 가속도가 $10m/s^2$ 이니까...

S8 : 아 $F=ma$ 니까. 1초에 최대 10m/s 속도를 줄일 수 있다는 거잖아.

S10: 그러면 고속도로에서 30m/s로 달리고 있는데 10m/s까지 줄이래. 하이패스는 그래서...

S8 : 그럼 2초 걸리겠네.

S10: 어 줄이는데 2초가 걸려 그러면 속도를 30에서 10으로 줄이는데 2초가 걸리는데

S8 : 그러면 걸린 시간 측정 해야겠네.

S10: 어 그럼 그 뜻은 내가 브레이크를 밟고 2초 후에 하이패스에 들어가면 된다는 거잖아.

S8 : 어.

S10: 그러면 이 속도가 30-10t만큼...브레이크를 밟는 구간에서...

S8 : 30-10t. 왜 이거야? 아 이해했어. 이해했어.

S10: 2초 동안에 30-10t인데 그래서 이거를 그래프로 그려가지고 넓이를 구하면 여기가 40이거든? 여기가 40이면 여기가 120에서 160가잖아.

S8 : 이게..y축이 뭐지..?

S10: y축이 v고 이게 t야.

S8 : t 그러면 이동거리겠네.

S10: 어 이 이동거리가 여기가 40.

S8 : 40이잖아 그럼 이게 160이지.

S10: 여기 전체가 100인데.

S8 : 아 100이구나.

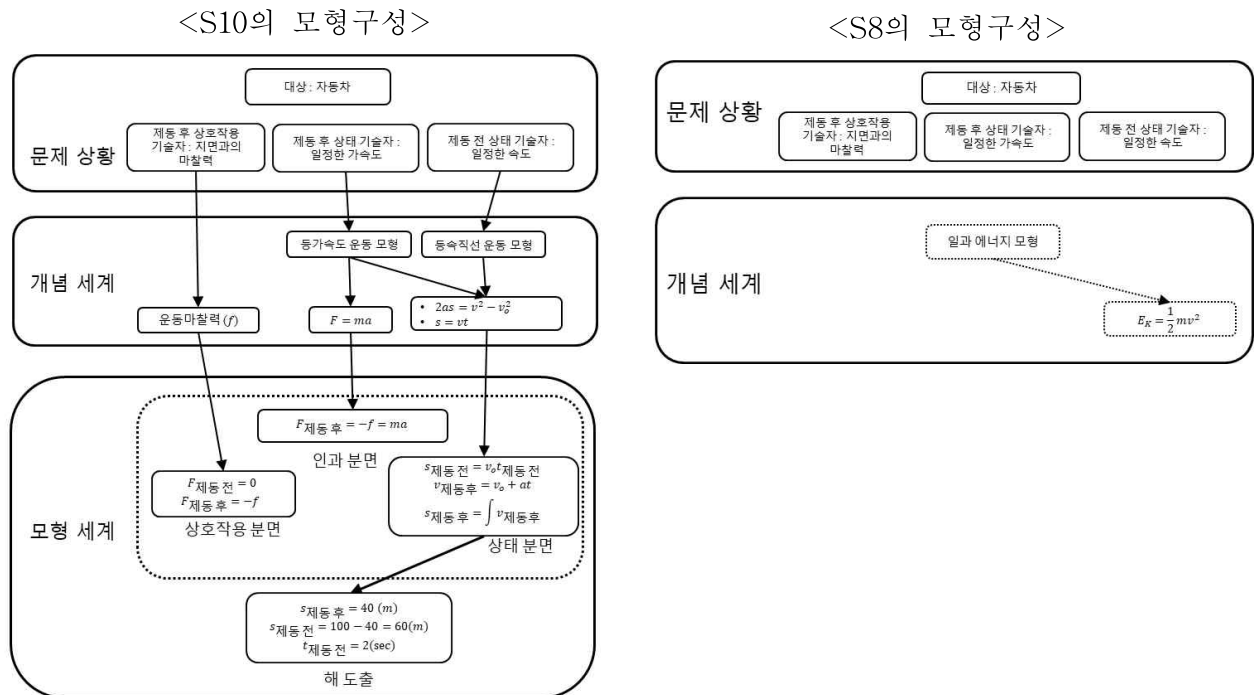
S10: 60이잖아.

S8 : 여기 60에다 30을 나눠서 2가 나온다고?

S10: 응.

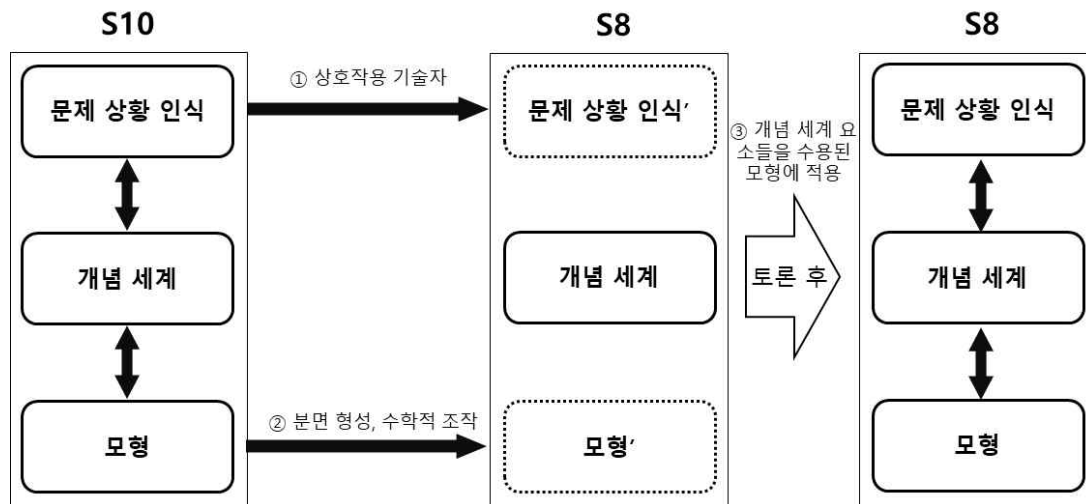
S8 : 아~ 쉽네...

위 담화에서 피교수자인 S8은 임의적으로 일-에너지 모형을 선택하여 모형을 구성하고자 한 ID 유형의 참여자였다[그림 4-34]. S8은 문제 상황을 면밀하게 분석하여 일-에너지 모형을 적용한 것이 아니라 떠오르는 공식 중의 하나를 임의로 사용했던 것이다. 따라서 본인의 모형을 고려하지 않고 전적으로 S10의 모형을 수용하고자 하는 모습을 보인다. 그러나 S10은 이전 7번 문항 1조와 7조 사례의 피교수자들보다 훨씬 적극적인 자세로 소집단 상호작용에 참가하며 자신의 개념 세계와 교수자의 모형을 연계하여 수용하고자 하는 모습을 보인다.



[그림 4-34] 튜터링에 참여한 교수자와 피교수자(ID)의 모형구성 비교

[그림 4-35]에 S10과 S8의 모형구성 요소의 상호작용을 도식화하였다. 요소를 연결하는 화살표가 이전 사례와 달리 일방향인 이유는 S8이 사전에 인식하고 있던 문제 상황과 모형이 담화에서 S10에게 전달되지 않고 S10의 모형구성을 수용하기만 하는 일방적인 형태의 상호작용이 관찰되었기 때문이다. 교수자인 S10은 자동차에 작용하는 최대 마찰력을 상기시키고(①) 이를 상태 분면과 인과 분면에 적용하여 브레이크가 작동한 후의 가속도와 이때의 제동 시간을 구하였다(②). 그리고 브레이크가 작동하는 구간의 그래프를 작성하여 상태 분면을 구성하고 넓이를 계산하여 제동 거리를 구하는 방법을 설명하였다(③).



[그림 4-35] 튜터링에 참여한 S10과 S8의 상호작용과 모형구성 변화

S8은 스스로 구성한 모형 분면이 없는 피교수자이므로 전적으로 S10의 모형을 수용하는 방식으로 소집단 상호작용에 참여하고 있다. 두 참여자의 소집단 상호작용에서 가장 인상적인 부분은 S8이 S10의 모형을 자신의 개념 세계와 연관 지으며 수용하고 있다는 점이다. 위 담화에서 밑줄 친 S8의 발화는 S8의 개념 세계와 수용된 모형을 연결하는 것으로 S8이 운동 2법칙, 가속도와 속도의 관계, 속도-시간 그래프의 넓이에 관한 개념을 이해하고 있음을 보여주고 있다. S8은 S10의 모형을 수동적으로 수용하지 않고 자신의 개념 세계를 활용하여 S10의 모형과 문제 상황 인식을 이해하였으며 최종적으로 각 요소가 모두 타당하고 일관된 모형을 구성하게 되었다(③). S8이 이러한 방식으로 모형구성이 가능했던 이유는 등가속도 운동과 등속직선 운동 모형에 대한 지식이 뒷받침되었기 때문이다. 비록 S8은 담화 전에는 이러한 지식들을 문제 상황에 적용하여 모형을 구성하는 방법을 모르고 있었지만 S10의 모형을 자신의 개념 세계를 매개로 이해하고 수용함으로써 모형구성 요소들이 내적 일관성을 갖추게 되었다. S8은 1, 2번 문항에서는 모두 IG 유형이었으나 3번과 문제 상황이 유사한 4번 문항에서 A4 유형이 되었다는 점에서 3번 문항의 튜터링은 S10 개념 세계를 활용하여 모형을 구성하는데 의미 있는 기여

를 했다고 볼 수 있다.

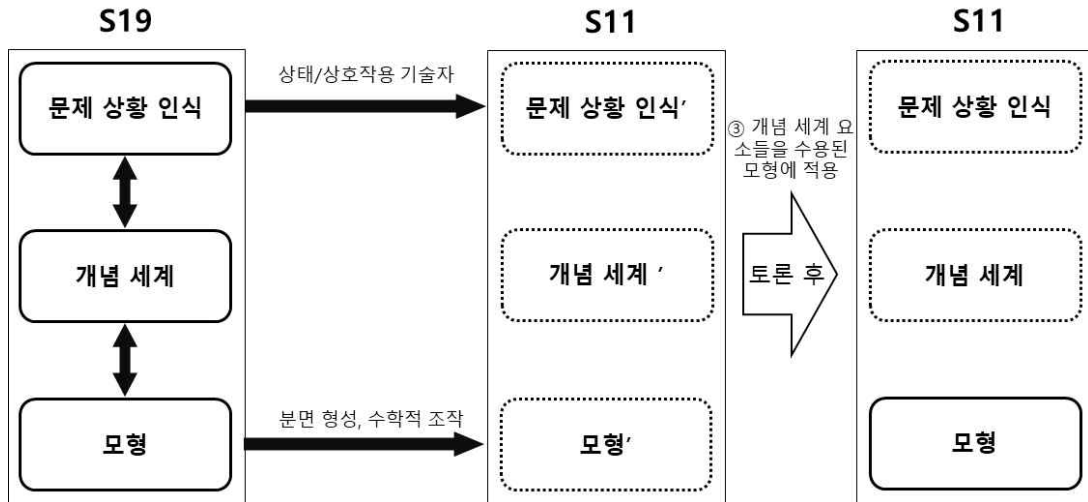
반면 개념 모형에 대한 이해와 지식이 현저히 부족한 피교수자들은 교수자의 모형을 수용하는 과정에서 자신의 개념 세계의 보완도 이뤄져야 한다. 따라서 1)의 7번 문항 7조의 사례에서처럼 개념 세계의 상호작용이 명시적으로 이뤄지거나 수정된 모형과 문제 상황 인식간의 내적 일관성을 확보해가는 과정에서 피교수자가 자발적으로 개념 세계의 모순과 결핍을 인지하고 이를 보완해야 한다. 다음은 12번 문항 3조 S19(A4)와 S11(IG)의 담화이다.

S19: 애가 $F-t$ 그래프잖아. Ft 가 충격량이지, 그럼 200곱하기 4 곱하기 $1/2$ 하면 얼마 돼? 400나오겠지? 근데 400이 $mv - mv_0$ 잖아. m 은 여기서 50kg이랬지?... (중략)...그니까 $50v_0$ 야. v_0 가 8이야. v 가 0이니까. v_0 가 8인데 나중속도가 0이잖아. 근데 a 가 중력가속도지 여기서 떨어지니까? 그래서 t 가 0.8.

S11: 충격량...지구과학이나 같까. 이해를 포기한다.

피교수자인 S11은 12번 문항에 관한 모형 분면을 전혀 구성하지 못하고 직관적으로 해를 추측한 상태였으므로 모형구성 요소 간의 상호작용은 일방향으로 일어났다[그림 4-36]. 또한 S19의 설명은 모형 생성과 기술자 식별 단계가 혼재되어 나타나 그 순서를 명확히 구분하기가 어렵다. S11은 S19의 문제 상황 인식과 모형을 수용하는 과정에서 어떤 개념 세계의 결핍을 대면했는지 드러내지 않음은 물론 이를 해결하기 위한 질문 또한 없었으므로 개념 세계의 상호작용은 일어나지 않은 것으로 볼 수 있다. 12번 문제는 가속도 운동 모형이므로 이를 정량적으로 해결하기 위해서는 충격에 의한 운동 모형을 선택하여야 한다. 그러나 S19의 설명에서 개념 모형과 문제 상황의 동형성(isomorphism)에 대한 언급은 없다. 따라서 S11은 소집단 상호작용 이후에도 문제 상황의 특정 유형 혹은 기술자에 대한 명확한 인식이 결여되었을 가능성이 크다. 결국 S11은 S19의 모형 혹은 모형의 수학적 결과만을 수용한 것이며 문제 상황

인식, 개념 세계 및 모형이 일관된 모형구성에 성공했다고 보기 어렵다.



[그림 4-36] 튜터링에 참여한 S19와 S11의 상호작용과 모형구성 변화

이전 사례의 S8과 달리 S11이 S19의 모형을 수용하여 일관된 모형구성을 하지 못한 이유를 두 가지 측면에서 논할 수 있다. 첫 번째 측면은 S11의 소극적인 태도이다. S8이 교수자의 설명에 적극적으로 호응하고 질문하는 등 담화에 능동적으로 참여한 것과 달리 S11은 질문을 하지 않고 S19의 설명을 듣고만 있다. 만약 충격량에 대한 설명이 이해가 가지 않았다면 잠시 설명을 끊고 이에 대해 질문할 수도 있음에도 S11은 이러한 적극적인 노력을 보이지 않았다. 만약 S11이 적극적으로 충격에 의한 운동의 개념이나 기술자들에 대해 질문했다면 개념 세계의 상호작용을 유도할 수도 있었을 것이다. 또 다른 측면은 충격에 의한 운동 모형에 관한 S11의 지식 혹은 이해의 부족이다. 개념 모형에 관한 지식과 이해가 현저히 부족한 경우 피교수자들은 모형의 수용만으로 자발적으로 개념 세계의 결핍을 보완하기 어려움은 물론 무엇을 질문해야할지 막막할 것이다. 물리 문제해결은 학습자가 문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 설명 체계를 구성하는 활동이다. 이러한 관점에서 개념 모형에 대한 이해가 현저히 떨어지는 참여자들의 경우 문제해결보다는 개념 모

형에 대한 기본적인 이해와 지식의 습득을 도와줄 수 있는 활동이 선행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

종합하면 ID나 IG 유형의 참여자들이 피교수자인 튜터링은 모형과 문제 상황 인식 간의 상호작용이 주로 관찰된다는 점에서 A2, A1 유형을 대상으로 하는 튜터링과 유사하다. 그러나 설명이 교수자에서 피교수자로 일방적인 전달되며 담화에서 피교수자의 문제 상황 인식과 모형이 드러나지 않는다는 점에서 차이를 보였다. 3번 문항 8조와 12번 문항 3조의 사례를 통해 튜터링이 ID와 IG 유형의 참가자들의 모형구성에 의미 있게 기여하기 위해서는 피교수자가 관련 개념 모형에 대한 어느 정도의 지식을 가지고 있어야 하며 이를 매개로 교수자의 모형을 이해하는 것이 중요함을 확인하였다. 피교수자가 소극적으로 상호작용에 참여하거나 개념 모형에 관한 개념 도식을 가지고 있지 못하면 모형의 결과적인 측면만을 수용하여 내적으로 일관된 모형구성에 실패할 개연성이 크다.

본 연구에서 잠정적으로 확인한 일부 경향성에도 불구하고 튜터링이 모형구성에 기여하는 바에 대한 일반적인 결론을 내리는 것은 다음과 같은 요소로 인해 제한된다. 참여자의 성격, 동료와의 친밀함, 인지적인 부하 정도 등에 따라 튜터링의 양상은 달라졌다. 본 연구에서 거의 대부분의 문항에서 모형을 구성하지 못한 S6과 S16은 내향적인 성격으로 소집단 상호작용에 참여하는 것을 부담스러워했다. 결국 두 참여자가 모형구성에서 어떤 어려움을 겪고 있으며 교수자의 설명이 그들의 모형구성에 어떠한 기여를 하였는지 확인하기 어려웠다. 또한 동료와의 과도한 친밀함이나 어색함은 상호작용에서의 집중력과 적극성을 저해하는 요인으로 관찰되었다. 뿐만 아니라 인지적인 부하가 과도하다고 느낀 IG나 ID 유형의 참여자 중 일부는 모둠에 토의에 참여하지 않고 겉도는 모습을 보이기도 하였다.

4.3.2. 경쟁

경쟁은 다른 구조의 모형을 구성한 참여자들 간의 상호작용이다. 튜터링에서는 피교수자가 교수자의 모형이 타당하다고 암묵적으로 혹은 명시적으로 인정한 상태에서 교수자와 상호작용하지만 경쟁에서는 참여자들은 각자의 모형이 타당하다는 입장에서 대등하게 상호작용에 참여한다. 경쟁에 참여하는 참여자들의 모형은 해가 문항의 보기 중의 하나와 일치하여 타당성의 외적 요인을 충족한 상태였다. 따라서 참여자들은 주로 타당성의 내적 요인을 기준으로 어떤 모형이 적합한지 논의하고 이를 통해 합의를 도출하고자 한다.

1) 합의를 통한 모형의 수용

먼저 모형 간의 비교와 평가를 통해 참여자들이 어떤 모형구성이 적합한지 합의하고 이를 수용하는 경우이다. 10번 문항 4조 S17(A4)과 S13, S31(A2)의 사례를 통해 이에 대해 구체적으로 논의하고자 한다.

S13: 그러면 이렇게 둘이 가고 있어. 그 상태에서 영희가 당기잖아. 그니까 그냥 정지한 선에서 철수가 간다고 생각하면 되는 거야.

S17: 아니야 작용 반작용이잖아. 애가 애를 당기면 애도 애를 당기는 거야. 왜냐면 내가 애를 미는 동안 나도 애한테 밀리는 건 똑같은 거잖아. 봐봐 내가 칠 때. 그니까 방금 똑같잖아. 왜냐하면 작용 반작용할 때...

S13: 아 근데 근데 그냥 철수가 온다고 생각을 하면 5번이 맞거든? (17번을 가리키며) 근데 애말 듣고 보니까...

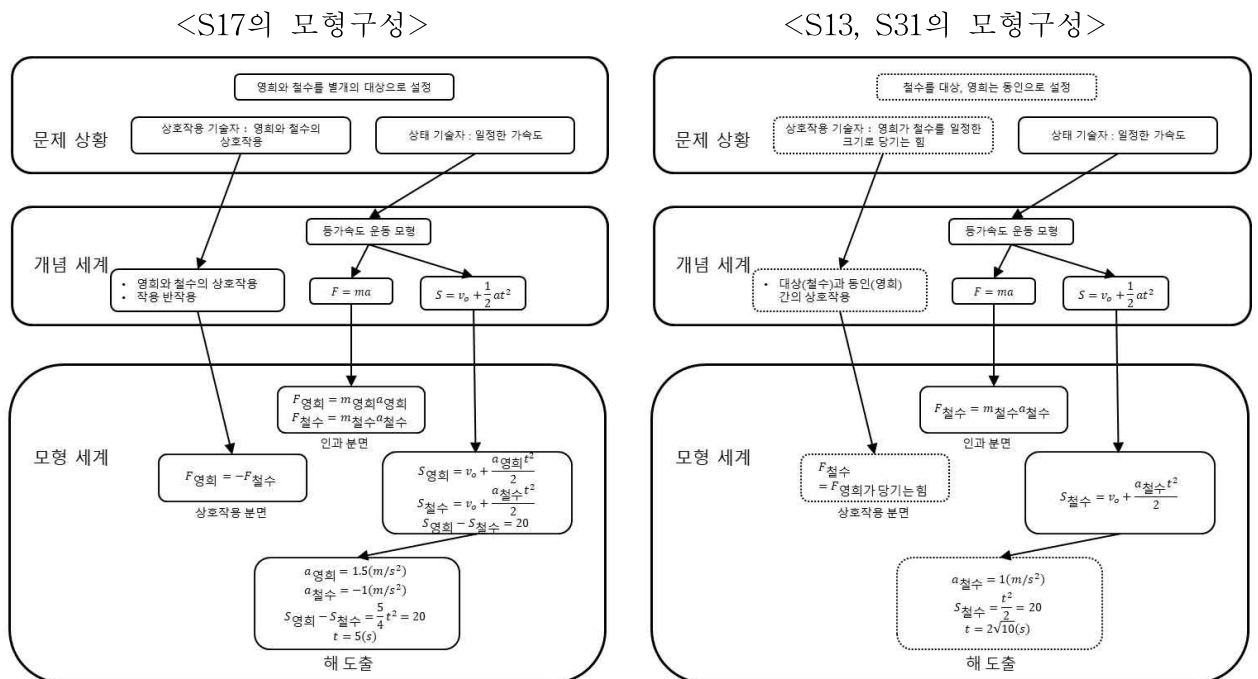
S17: 영희가 애를 75N의 힘으로 당기면 이쪽 방향으로 75N이 작용하잖아. 그러면 철수의 가속도가 $-1m/s^2$ 이잖아. 그러면 영희는 $3/2m/s^2$ 이거고. 그럼 어차피 여기서 $2m/s$ 를 왜 생각할 필요가 없냐면. 네 말대로 어차피 멈춰있다 생각하면

똑같은 거야. 왜냐하면 멈춰있을 때랑 내가 당겼을 때 하고 움직일 때 당기는 거하고 가속도는 같으니까. 같은 시간동안 이동한 거리가 같단 말이야...(중략)

S13: 그니까 나랑 31번은 이게 작용 반작용 생각 안하고. 애만 된다고 생각을 했어. 그럼 그냥 간단하게 5번이 나와.

S31: (13번 말에 동의하고 17번을 가리키며) 애가 맞는 거 같아.

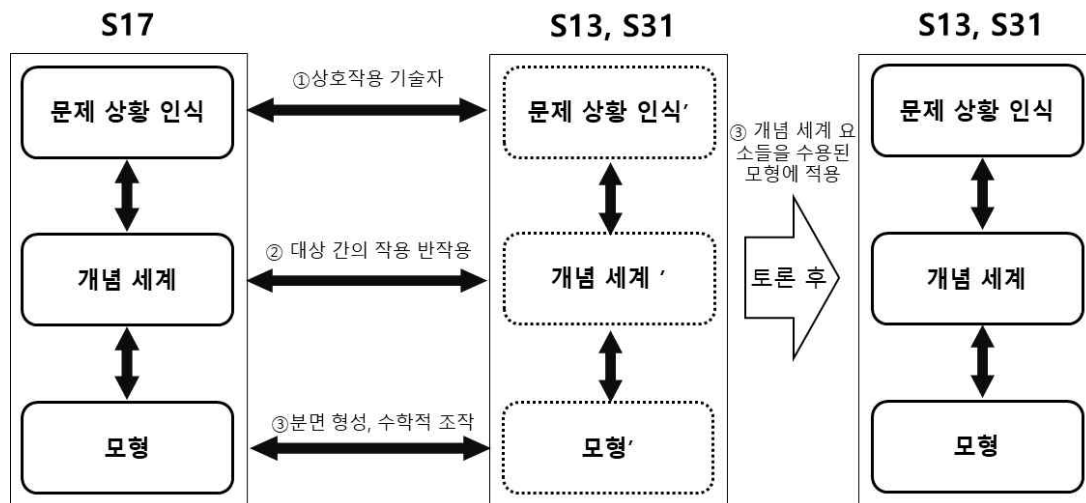
10번 문항 4조의 사례에서 참여자들은 모두 자신의 모형이 대응되었다는 판단 하에 소집단 상호작용에 참여하였다. S17은 영희가 철수를 당기는 힘의 반작용을 고려하였고 S13과 S31은 반작용을 고려하지 않고 철수만 끌어 당겨진다고 인식하고 모형을 구성하였다[그림 4-37]. 즉, 두 모형의 차이는 상호작용 기술자 식별에서 비롯되었다고 할 수 있으며 참여자들은 각자가 식별한 상호작용 기술자에 일관되게 모형을 구성하였다



[그림 4-37] 경쟁에 참여한 S17(A4)과 S13, S31(A2)의 모형구성 비교

위 사례에서 참여자들의 소집단 상호작용을 [그림 4-38]에 도식화하였다. 담화 초기 S13과 S17은 대상에 작용하는 상호작용 기술자에 대한 의견을 보이고 있다. S13은 철수에게만 힘이 작용하며 S17은 영희와 철수 모두에게 힘이 작용한다고 주장하고 있다(①). S17은 S13을 설득하기 위하여 작용 반작용에 대한 개념적 설명을 한 후에(②) 자신의 모형을 상세히 제시하고 있다(③).

S13과 S17은 외형적으로 보면 상호작용 기술자 식별에서 어려움을 겪은 것으로 보이지만 본질적인 원인은 작용 반작용에 관한 개념 세계의 결핍에서 비롯된 것이다. 따라서 문제 상황 인식의 상호작용은 자연스럽게 개념 세계의 상호작용으로 전환되었으며 이를 통해 S13과 S31은 작용 반작용 개념을 받아들이고 S17의 모형이 타당함을 합의하였다.



[그림 4-38] 경쟁에 참여한 S17과 S13, S31의 상호작용과 모형구성 변화

10번 문항 4조의 사례와 같이 경쟁 유형으로 소집단 상호작용을 하는 참여자들은 대응된 모형을 구성한 참여자가므로 상대방의 모형을 수동적으로 수용하지 않고 어떤 부분에서 차이가 있고 어떤 모형이 타당한지 평가한다. 이 과정에서 모형뿐만 아니라 문제 상황 인식의 상호작용이 일어나게 된다. 만약 모형의 차이가 단순한 문제 상황의 오인이 아닌 개념 세계에서 기인한 것이라면 개념 세계 간의 상호작용도 일어나게 되며

이 과정을 통해 참여자들은 개념 세계의 결핍과 모순을 대면하고 이를 보완할 기회를 얻게 된다. 동료의 모형을 수용함으로써 모형을 수정한다는 점에서 경쟁은 A2, A1을 대상으로 하는 튜터링과 상당히 유사하다. 그러나 모둠원들의 역할이 고정적이지 않고 대등하며 자신의 모형과 문제 상황 인식, 개념 세계를 명시적으로 노출한다는 점에서 경쟁은 튜터링 보다 더 역동적이고 적극적으로 참여자의 모형구성에 기여한다고 볼 수 있다.

2) 모형의 고수

한편, 모둠 내에서 모형의 합의가 이뤄지지 않을 경우 경쟁은 지속된다. 9번 문항의 경우 전체에서 가장 높은 빈도(7회)로 경쟁 유형이 나타났다. 모둠원들 간에 합의가 이뤄지지 않고 각자 자신의 모형을 고수하는 경우도 자주 관찰되었다. 9번 문항의 어떤 요인이 참여자들 간의 경쟁을 유발하며 자신의 모형을 고수하게 했는지 논의할 필요가 있다. 다음은 9번 문항 4조 참여자들의 담화이다.

S9 : $F=ma$ 로 따지고 애(소형차)는 가속도가 5니까 5,000N이지?
 애(트럭)는 10,000N이고. 근데 애(트럭)는 힘이 없잖아. 애(소형차)가 애(트럭)를 밀어주는 거잖아. 밀어주는 힘이 10,000N이니까. 작용반작용에 의해서 반대쪽 힘도 10,000N. 그래가지고.

S28: 근데 왜 나는 애초에 그냥 차가 이렇게 운동하니까. 애(소형차)가 처음에 15,000N, 15,000N의 힘을 줘가지고 이렇게 움직이는 거니까. 트럭도 애(소형차)를 15,000N을 밀어서 움직이는 줄 알았어. 아닌가?

S12: 그렇게 따지는 거 아니야?

S21: 아니야. 아니야.

S28: 그러니까 처음에 트럭을 밀 때 애(소형차)가 가속도를 많이 줘가지고 15,000N의 힘으로 미니까.

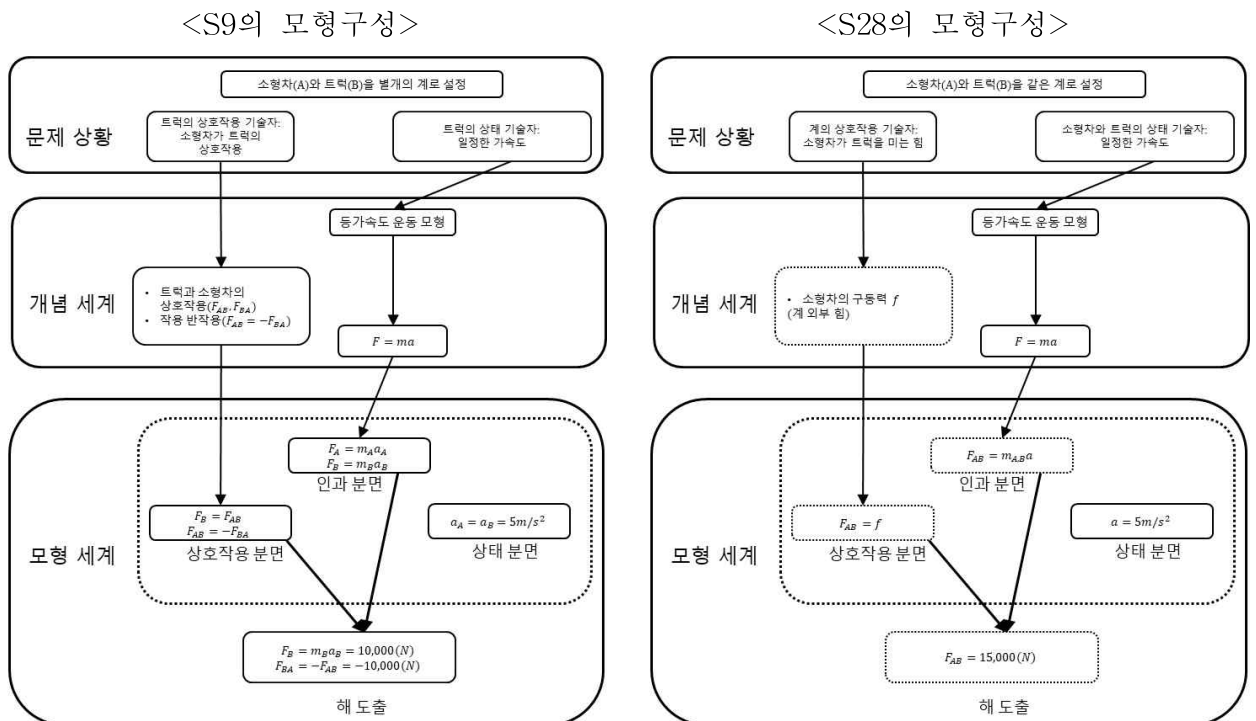
S9 : 근데 15,000N을 미는 거는. 미는 방향의 반대가 아니라 앞으

로 이동을 하는 거 아니야?

(중략)

S28: 난 아무리 봐도 D야. 맞아 이게. 15,000N으로 미니까 같이 이렇게 딱 가는 거지.

위 사례에서 S9와 S28은 토론이 끝난 후에도 합의하지 않고 자신의 모형을 고수하였다. [그림 4-39]를 통해 두 참여자의 모형구성을 비교해보면 S9는 트럭만을 계로 설정하여 트럭이 소형차를 미는 힘을 이용하여 소형차가 트럭을 미는 힘을 구하고자 하였다. 반면 S28은 소형차와 트럭을 하나의 계로 설정하여 모형을 구성하였다. 그러나 S28은 계 내부의 상호작용인 소형차가 트럭을 미는 힘을 계 외부의 힘이라고 오인하여 인과 분면에 포함하였다.



[그림 4-39] 경쟁에 참여한 S9(A4)와 S28(A2)의 모형구성 비교

계 외부의 힘, 즉 자동차 타이어와 지면 사이의 정지마찰력을 인식하

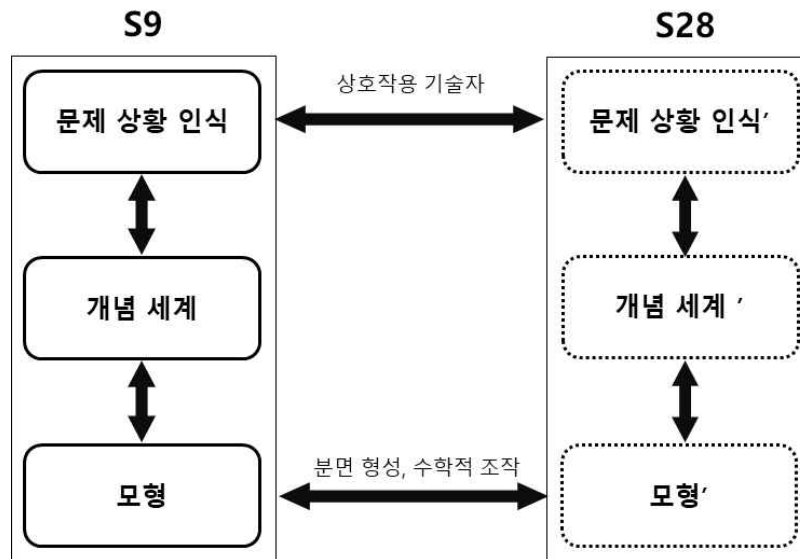
지 못한 S28은 소형차가 트럭을 미는 힘을 계 외부에서 작용하는 힘으로 오인한 것으로 보인다. 뉴턴 역학의 계와 관한 일반 규칙에 따르면 계 내부 대상간의 상호작용은 계 전체 운동에 영향을 줄 수 없다. 타당하지 않은 모형구성에도 불구하고 S28이 자신의 모형을 계속 고수하고 S9의 모형을 수용하지 않은 이유는 S9의 모형에서는 계 전체의 운동에 영향을 미치는 외력이 고려되지 않았기 때문이다. S9는 트럭만을 계로 설정했으므로 소형차가 트럭을 미는 힘만이 계(트럭) 외부의 상호작용이다. 따라서 S9는 명시되지 않은 상호작용을 고려할 필요 없이 트럭의 인과 분면을 구성할 수 있다. 결국 S9와 S28은 각자의 계 설정이 다르다는 점을 인지하지 못한 채 모형과 상호작용 기술자에 관한 논의만을 진행했기에 때문에 어떤 모형이 적합한지에 대해 끝내 합의하지 못하였다.

이를 S9와 S28의 모형구성 요소의 상호작용 관점에서 보면 개념 세계의 상호작용 보다는 모형과 문제 상황 인식의 상호작용만이 부분적으로 일어나고 있다고 해석할 수 있다[그림 4-40]. 두 참여자는 계를 다르게 설정했으므로 상호작용 기술자 식별과 각 분면이 상이할 수밖에 없다. 이러한 상황에서 참여자들은 이전 10번 문항 4조의 사례와 같이 모형의 상이함이 기인하는 계의 설정에 관한 논의를 했어야 한다. 그러나 이 사례에서는 계의 설정과 이와 관련된 개념 세계의 상호작용이 일어나지 않고 모형의 상호작용 분면에 대한 상호작용이 지속되었기 때문에 모형의 타당성에 대한 합의에 이를 수 없었다. 이는 참여자들이 계에 관한 일반 규칙에 대해 무지하였거나 모형의 차이가 계의 설정에서 비롯되었다는 것을 인지하지 못했기 때문이다.

이와 같이 경쟁을 통해 합의가 이뤄지지 않은 경우 참여자들의 모형구성의 변화나 개념 세계의 보완을 확인할 수는 없었다. 그러나 관련 내용에 관한 능동적이고 적극적인 논의를 유도함으로써 자신의 생각을 명료화하고 인지적 갈등을 경험하게 한 것은 긍정적인 측면이라 할 수 있다.

위 사례에서 참여자들이 모형의 타당성을 평가하는데 있어 어려움을 겪은 부분이 계의 설정이라는 점은 교수적인 측면에서 시사하는 바가 크

다. 모형구성 관점에서 물리 문제해결은 문제 상황에 관한 설명 체계를 구성하는 것이다. 따라서 문제 상황을 어떻게 인식하고 계를 설정하는가에 따라 모형의 구조와 요소는 달라진다. 그러나 중학교 이후의 물리 교육과정이나 교과서에서 이러한 부분에 대한 명확한 내용과 지침이 다루지 않고 있다. 이로 인해 많은 참여자들이 계 내부와 외부의 상호작용을 구분하는 것이 왜 중요하며 어떤 상호작용을 계의 인과 분면에 적용해야 하는지 혼란을 겪고 있는 것이다(Ji *et al.*, 2016). 따라서 뉴턴 역학의 기초적이고 핵심적인 가정과 특성을 학습하는데 있어 운동 법칙 중심의 전통적인 내용 조직이 적합한가에 대한 심도 깊은 논의가 필요할 것으로 보인다.



[그림 4-40] 경쟁에 참여한 S9와 S28의 상호작용

4.3.3. 협업

모둠 내에 대응된 모형이 없거나 논의 과정에서 모형이 기각된 경우 참여자들은 협업을 통해 모형을 수정하거나 새롭게 생성하고자 한다. 일부 모둠은 협업을 통해 모형구성에 성공한 반면, 모형을 구성하지 못한

채 토의를 마친 모둠도 있었다. 사례 분석을 통해 협업에서 모형구성 요소의 상호작용 양상을 분석하여 협업의 각 사례에서 소집단 상호작용이 모형구성에 다른 영향을 미치는지 그 이유를 탐색하고자 한다. 다음은 협업을 통해 모형을 타당하게 생성한 6번 문항 6조의 사례이다.

S26: 나 $\sqrt{8}m/s$ 나왔는데. 찍었다니깐. 나 풀었는데 풀 때마다 $\sqrt{8}m/s$ 나와.

S25: 가속도 $0.5m/s^2$ 맞지 않나...?

S23: 그러면 가속도가 일단 $0.5m/s^2$ 이고

S26: $0.5m/s^2$ 인데 내가 그래프를 그렸거든?

S23: 나도 그렇게 했어.

(중략)

S23: 그니까 $4\sqrt{2}$ 나왔어. 난 t 가.

S26: 그니까 $4\sqrt{2}$ 가. 나도 나와 가지고. v 가 $2\sqrt{2}m/s$ 나왔어.

S23: 거기까지는 우리가 틀린 건 아닌 거 같아.

(중략)

S23: 설마 이거냐?(활동지를 가리키며) 설마 이게 포인트는 아니겠지?

S25: 아 근데 이거(힘) 증가시키니까. 여기서 10N이라고 했으니까 똑같으니까 딱 가는 거 아닌가? 가속도가 $0.5m/s^2$ 인데.

S23: 아 5번 문제 초기 상황이었네 이게..(학습지를 넘기며)이거 이거...

S1 : 아 E번 나온다...마찰력 계산하면 E번 나와.

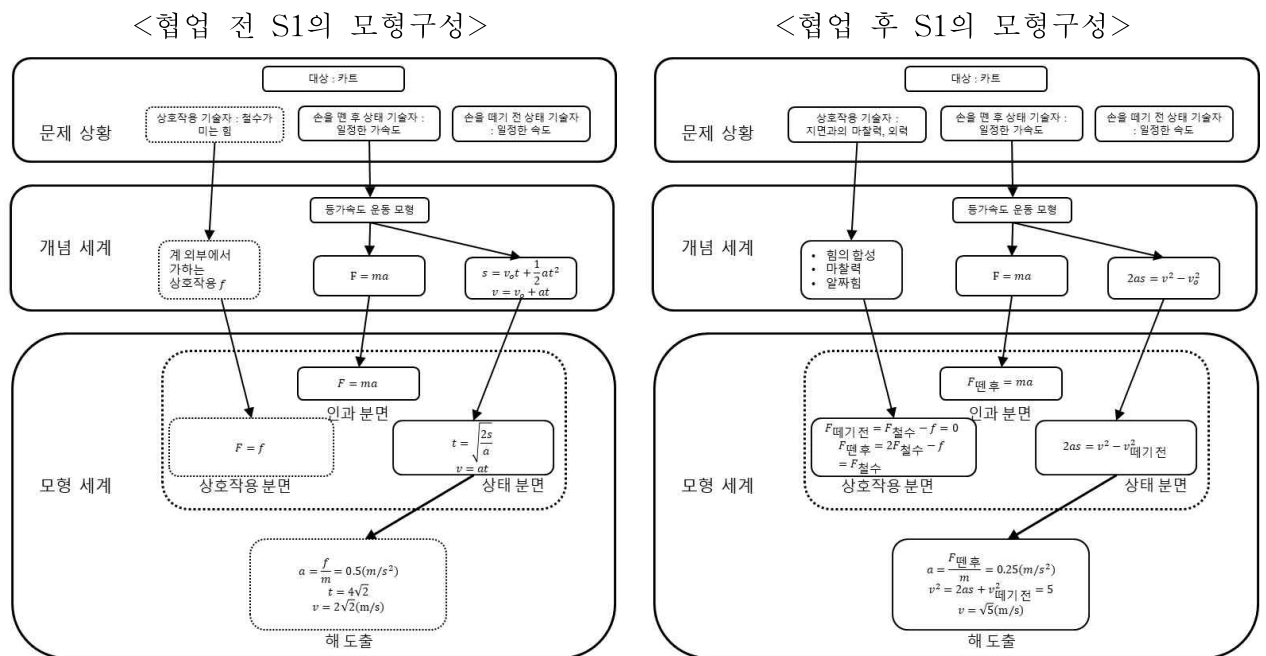
S25: 답이 무엇으로 나왔어?

S1 : $\sqrt{5}m/s$ 나와 마찰력 계산하면... 마찰력까지 계산하면. 이게 가속도가 $1/4m/s^2$ 이 되거든...

S25: 마찰력이 있었어...몰랐어...왜 이상하더라...

6번 문항 6조는 A2 모형을 구성한 참여자가 3명(S1, S23, S26)이 있었으나 모형의 해가 보기에 없었으므로 이들은 자신의 모형이 대응되었다고 판단하지 않았다. 유일한 A1 유형인 S25도 상태 분면을 구성하지 못

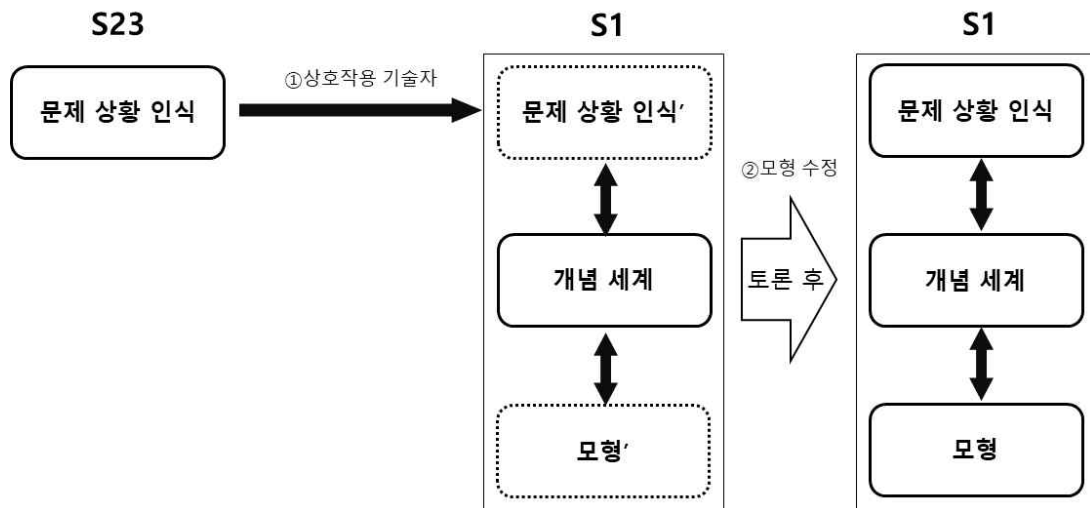
했다는 점을 제외하면 위의 3명과 유사하였다. 담화 초기부터 이들은 적극적으로 자신의 모형과 문제 상황 인식을 공유하며 모형을 구성하고자 하였다. 이들은 공통적으로 카트에 작용하는 마찰력을 인지하지 못하고 철수가 미는 힘만이 외력이라고 인식하고 있었다[그림 4-41]. 카트에 마찰력이 작용하지 않았다면 이들의 모형은 문제 상황과 일관된 것이므로 담화 초기 6조의 모둠원들은 자신들의 모형구성에서 어떤 문제가 있었는지 파악하지 못하였다. 그러나 S23이 문제 상황의 중요한 조건을 지적하면서 모형구성의 전환점을 맞게 된다. S23이 6번 문항이 5번 문항의 초기 상황에서부터 사건이 진행된다는 점을 발견하고 이를 알리자, S1은 카트에 마찰력이 작용하고 있음을 인지하고 모형을 수정하였다.



[그림 4-41] 협업에 참여한 S1의 모형구성 변화

[그림 4-42]는 S23이 문제 상황 인식의 문제점을 찾아내어 이를 공유하고 S1이 모형을 수정하는 과정을 도식화한 것이다. S1은 놓치고 있던

상호작용 기술자를 S23과의 문제 상황 인식의 상호작용을 통해 인지하고 (①) 이를 상호작용 분면에 적용하여 모형을 수정하였다(②).



[그림 4-42] 협업에 참여한 S23과 S21의 상호작용과 모형구성 변화

협업 유형에서 모형의 수정은 Clement(1989, 2008)의 GEM 순환과 상당히 유사하다. GEM 순환은 초기 모형이 비판을 수용하여 수정되는 절차를 거쳐 더욱 복잡하고 정교한 일련의 모형들을 고안해가는 과정으로 본 연구의 6번 문항 6조 사례에서 모두의 모형이 GEM 순환 과정을 거쳐 발달되는 것을 확인할 수 있었다. Clement(1989, 2008)의 GEM 순환 과정은 실험 데이터나 경험적 사실을 기반으로 모형을 평가하고 수정하는 것을 의미하지만 물리 문제해결에서는 동료와의 상호작용을 통해 모형이 수정됨을 확인되었다. 구체적으로 6번 문항 6조의 사례에서는 문제 상황 인식 간의 상호작용이 모형 수정에 핵심적인 역할을 하였다. 참여자들의 타당하지 않은 문제 상황 인식은 개념 세계의 결핍이 아니라 문항 제시문에 대한 이해 부족 탓이었다. 따라서 위 사례에서 개념 세계의 상호작용이나 개념 세계 변화는 관찰되지 않았다.

반면 참여자들이 타당한 모형구성에 실패한 이유가 개념 세계의 결핍에서 기인할 경우 협업을 통해 개념 세계의 보완이 이뤄져야만 타당한

모형구성이 가능할 것이다. 12번 문항 5조의 사례를 통해 이에 대해 논의하겠다.

S29: 그니까 이거 넓이가 뭘 의미해?

S7 : 운동량 아니야?

S29: 50 곱하기 10해가지고, F가 500이야. $F=ma$ 인데 500이야. 근데 여기서 넓이가 400이란 말이란 말이야. 그래서 여기서 400이고, 여기까지가 400이면 여기는 100일꺼란 말이야. 100N이. 그래서 100N은 50 곱하기 x해가지고, x는 2가 나왔지.

S20: a는 그니까 가속도가 a라는 거잖아?

S7 : 야 가속도가 2, 관련이 없잖아?

(중략)

S7 : 야 운동량 그거 속도랑 질량으로 하는 거 있지 않냐?

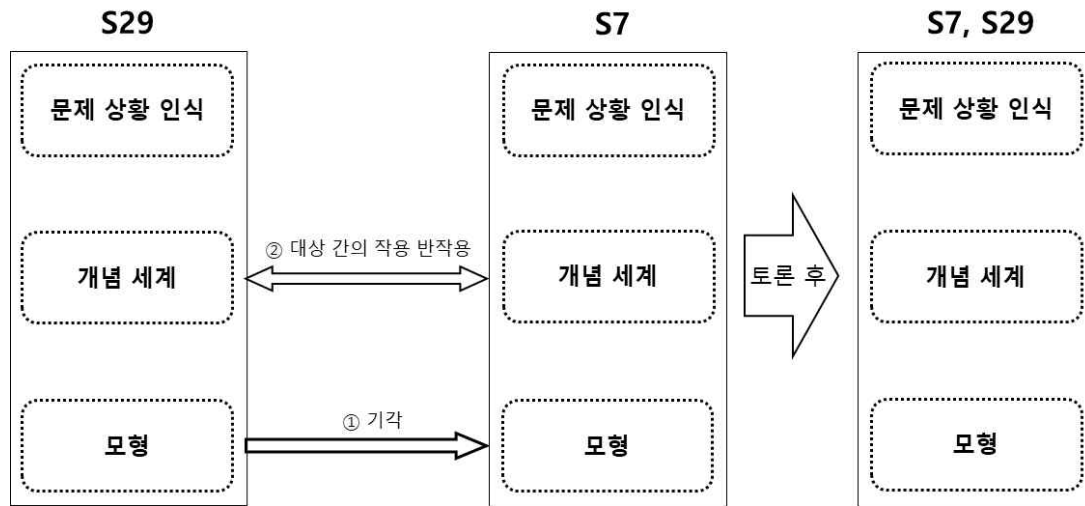
S29: 모르겠다.

S7: 그 Ns말고 이거 말고 하나 더 있었는데 기억이 안나. 이거 식 변형해가지고 mv로 나타낸 거 있거든?... Δmv 같아.

위 사례에서 S29는 ID, S7과 S20은 IG 유형의 참여자들이었다. S29는 운동 2법칙에 임의적으로 변인을 대입하여 나름대로 해를 도출했지만 S7에 의해 즉각적으로 기각되었다. S7은 등가속도 운동 모형으로는 모형을 구성할 수 없음을 알고 충격에 의한 운동 모형을 적용하기 위해 관련 지식을 동료들과 공유하고자 하였으나 결국 모형을 구성하지 못했다.

[그림 4-43]에 위 담화에서 모형구성 요소의 상호작용을 도식화하였다. S29의 모형이 S7에 의해 기각된 이후(①) S7과 S29 사이에 충격에 의한 운동 모형과 관련된 질의응답에서 개념 세계간의 상호작용이 짧게나마 이뤄짐을 확인할 수 있다(②). 그러나 S7은 S29와의 상호작용에서 개념적 결핍을 보완하지 못하고 스스로 관련 지식의 일부를 상기하긴 했으나 결국 모형을 생성하지는 못하였다. 이 사례를 통해 ID, IG 유형의 참여자들 간의 협업이 모형을 구성할 수 있을 정도로의 개념 세계 보완은 매우

어려운 것으로 보인다.



[그림 4-43] 협업에 참여한 S29와 S7의 상호작용과 모형구성 변화

또한 위 사례에서 주목할 만한 부분은 문제 상황 인식의 상호작용이 관찰되지 않았다는 것이다. 문제에서 제시하고 있는 가속도 그래프를 해석하여 대상의 상태와 상호작용에 대한 논의는 찾아보기 어려우며 임의적인 수학적 조작의 결과나 공식과 같은 단편적인 지식에 대한 언급이 있을 뿐이다. 즉, 문제 상황 인식에 대한 공유 없이 공식을 조합하여 답을 찾는데 주력하고 있었던 것이다. 이와 같이 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 분면을 구성한 모둠원이 없는 모둠에서 참여자간의 협업만으로 모형을 구성한 사례는 본 연구에서 단 한건도 찾을 수 없었다.

12번 문항 5조의 사례를 통해 개념 모형의 개념 도식이 충분히 형성되어 있지 않은 참여자들 간에는 개념 도식의 공유가 원활하지 않고 문제 상황 인식에 대해서도 유의미한 상호작용이 일어나기 어려움을 확인할 수 있었다.

두 사례에 대한 논의를 종합하면 협업을 통해 새로운 모형을 구성할 수 있다는 점은 문제해결에서 소집단 상호작용이 단순한 지식의 전수 이상의 의미가 있음을 알 수 있다. 그러나 전체 협업 유형 중에서 새로운 모형구성에 성공한 사례는 절반에 불과했으며 모두 A2의 모형을 일부

수정하는 방식이었다는 점은 협업이 모형구성에 기여하는 바는 제한적인 임을 의미한다. 즉, 개념 모형에 대한 지식을 가진 참여자들이 문제 상황 인식을 수정하고 이를 모형에 반영하는 것은 가능하지만 그렇지 못한 참여자들이 협업을 통해 새로운 모형을 구성해내는 것은 상당히 어려운 과제를 확인할 수 있었다.

4.3.4. 양립성 확인

양립성 확인에서 참여자들은 상대방의 모형을 평가하고 비판하기 보다는 모형 간의 유사성과 차이점을 식별하는 방식으로 상호작용이 진행된다. 본 절에서는 양립성 확인에서 모형구성 요소의 상호작용이 참여자들의 모형구성에 어떻게 기여하는지 탐색하고자 한다. 이를 위해 타당한 모형을 구성한 A4 유형 참여자들 간의 소집단 상호작용을 분석하고자 한다. 다음은 각기 다른 개념 모형을 선택하여 모형을 구성한 6번 문항 4조 S21(A4)과 S9(A4)의 담화이다.

S21: 이거를 아까 그냥 초기상황이라 해서. 마찰력 이거 했거든?
 그래서 이거(알짜힘)를 5N이라 간단히 생각했어. 일과 에너지로 해가지고 이거 5N으로 8m 갔으니까. 이 식 써가지고 40J이잖아. 40J에 $\frac{1}{2}mv^2$. 처음 속력이 1이니까 이렇게 하면...(중략) $v=\sqrt{5}$ 나와.

S9 : 일과 에너지 쓴 거야? 난 등가속도 썼는데

S21: 난 일과 에너지 썼어.

S9 : 그거 뭐지? 그 원래 아까는 -5N이 작용했으니까. 애는 애가 등가속도 운동 했을 힘이 5N이잖아. $F=ma$ 에서 (질량) 20이고 5N이니까. a 가 1/4이고. $2as = v^2 - v_0^2$ 해서 이게 1이고? v 지금 이걸로 구할 거잖아

S21: 응

S9 : 여기가 1/4에 8이니까 4고

S21: $F=ma...$

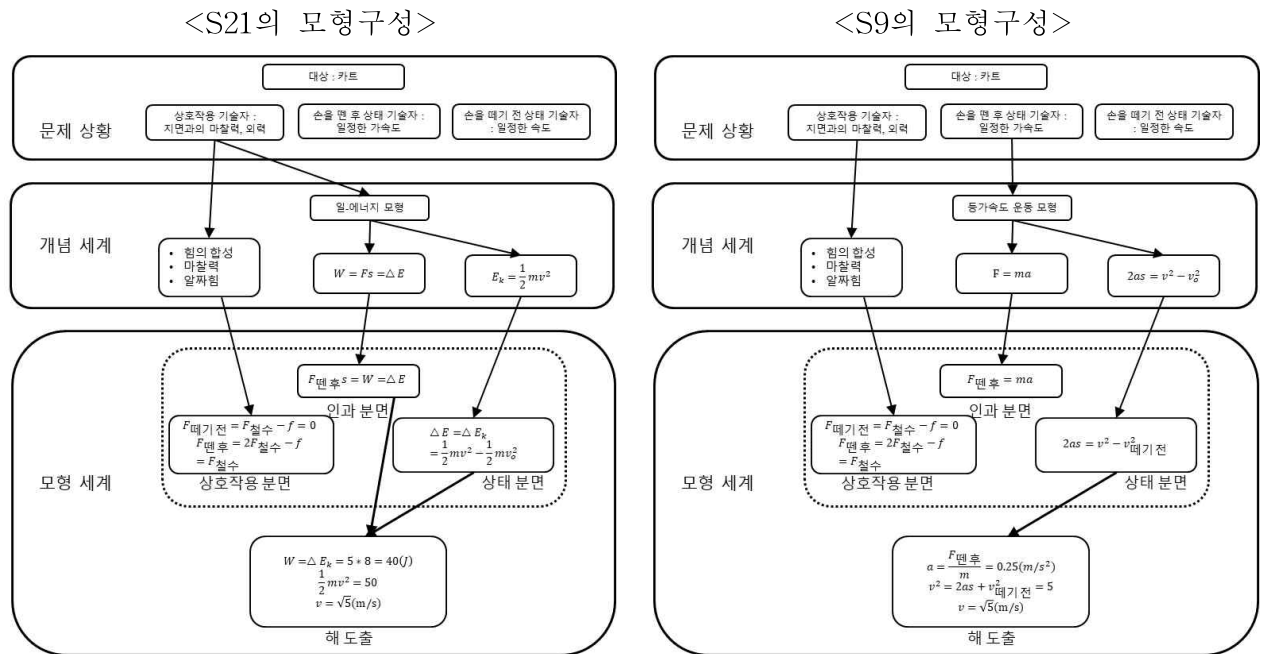
S9 : (21번에게)난 네 것을 쓰겠어. 일이 뭐라고 했어? 운동에너지?
지?

S21: 어어 일-에너지랑 운동에너지가 같다.

S9 : 아아 아니다(학습지를 가리키며). 이때 운동에너지랑 이때
운동에너지 차가 이거라고 했지?

S21: (끄덕끄덕)

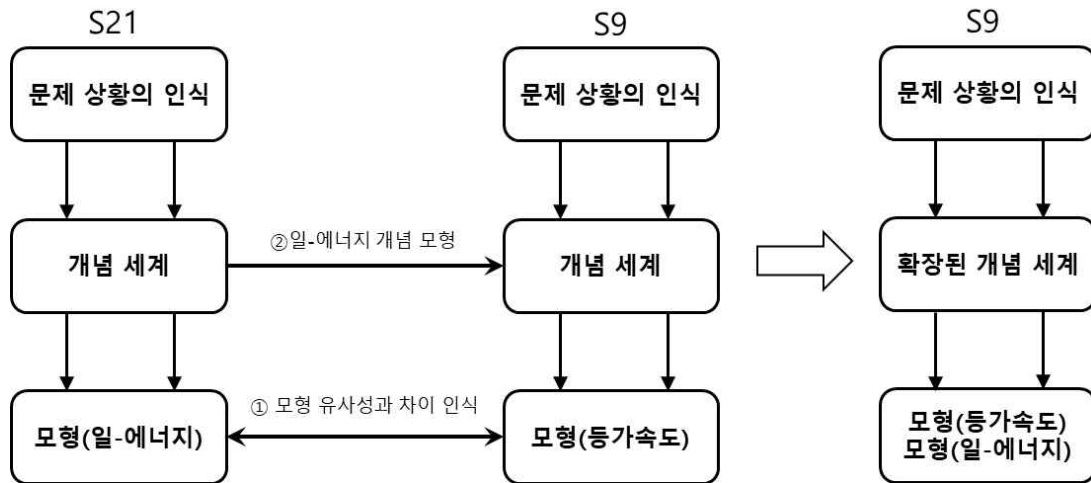
두 참여자의 모형구성을 [그림 4-44]에 도식화하였다. S21은 일-에너지 모형, S9는 등가속도 운동 모형을 선택하여 모형을 구성했다.



[그림 4-44] 양립성 확인에 참여한 S21과 S9의 모형구성 비교

두 참여자는 차례대로 자신의 문제 상황 인식과 모형을 상세히 제시하며 모형의 유사성과 차이를 인식해가고 있다([그림 4-45의 ①]). 두 참여자의 기술자 식별은 동일하였으며 상이한 개념 모형을 선택하였으므로 인과 분면과 상태 분면에서 차이를 보였다. S9는 S21의 모형을 수동적으

로 확인하는데 그치지 않고 직접적으로 일-에너지 모형에 대해 묻고 있다. 즉, S9는 S21과의 개념 세계 상호작용을 통해 일-에너지 모형의 개념 도식을 자신의 개념 세계에 추가하였다(②).



[그림 4-45] 양립성 확인에 참여한 S21과 S9의 상호작용과 모형구성 변화

6번 문항 4조에서 S9는 모형의 양립성을 확인하는데 그치지 않고 모형이 기반이 되는 개념 모형에 대해 적극적으로 질문함으로써 개념 세계의 확장을 경험할 수 있었다. 즉 양립성 확인은 다른 개념 모형을 선택한 동료의 모형을 접함으로써 참여자의 개념 세계와 모형이 확장되는 방식으로 모형구성에 기여할 수 있는 것이다.

그러나 양립성 확인에서 S9와 같은 긍정적인 사례가 늘 관찰되는 사례는 많지 않았다. 오히려 동료의 상이한 모형을 접하고 개념 모형에 관해 적극적으로 질의 응답하지 않았으며 개념 모형의 차이에서 오는 모형 간의 차이점과 유사성에 대해서도 논의하지 않는 경우가 많았다. 다음은 이러한 소극적인 양립성 확인의 대표적인 사례인 1번 문항 6조의 담화이다.

S28: 그 역학적 에너지 그걸로 했는데. 떨어지기 전에는 mgh 고
 지면에 닿을 때 에너지는 $\frac{1}{2}mv^2$ 인데 높이가 두 배가 되면
 속도는 거기 $\sqrt{2}$ 배가 되거든? 그래 가지고. 가속도는 일정
 한데 속도는 시간에 비례하니까 $\sqrt{2}$ 초.

S14: 나는 일단 하나는 그래프로 했고 하나는 평균속도로 했거
 든? 둘 다 결과적으로 똑같은 방법인데 평균속도는 0초에
 서 10초까지 가니까 둘이 합쳐서 1/2 나누면 5t야. $t \times 5t$
 하고... 그래서 그걸 거기를 10으로 하면은. t^2 은 2 나오니까.
 $t = \sqrt{2}$.

S30: 아~

S5: 어쨌든 간에 속도 시간 그래프를 그리면 아래 면적이 h일거
 아니야. 첫 번째 실험에서 근데 그 때 t가 1이니까. 이번에는
 두 배...2h 높이에서 떨어트리면 넓이가 두 배가 되는 거잖아.
 삼각형을 잘 이용하면 당연히 각 변의 길이가 $\sqrt{2}$ 배가 될
 수밖에 없어.

S28은 중력장에서의 역학적 에너지 보존을, S14와 S5는 등가속도 운
 동 모형을 선택하여 모형을 구성했다. 참여자들은 상이한 개념 모형에
 관해 적극적으로 질의 응답하지 않았으며 개념 모형의 차이에서 오는 모
 형 간의 차이점과 유사성에 대해서도 논의하지 않고 있다. 연구자의 해
 석으로는 모형에서 물리적인 오류가 발견되지 않는 한 참여자들은 다른
 모듈원의 모형과 자신의 모형을 비교하거나 대조하는데 소극적인 것으로
 판단된다. 즉 참여자들은 모형의 옳고 그름에 대해서는 적극적으로 판단
 하고 논쟁하지만 왜 복수의 모형이 양립할 수 있으며 어떤 측면이 다른
 가에 대해서는 그다지 흥미를 못 느끼고 있는 것이다. 이는 선행 연구에
 서 지적하고 있듯이 많은 참여자들이 문제의 정답을 찾는 것에 많은 의
 미를 부여하고 정작 문제가 갖는 물리적인 의미에 대해서는 무관심한 태
 도(Uden *et al.*, 2012; Balta *et al.* 2016; Niss, 2012, 2017)를 보이기 때
 문이라 생각된다. 양립성 확인 21건 중에서 위 사례와 같이 모형만을 확

인한 사례가 16건(76.2%)로 나타나 본 연구의 양립성 확인은 모형구성에 상당히 제한적으로 기여한다고 볼 수 있다.

양립성 확인에 대한 두 사례의 논의를 종합하면 다음과 같다. 양립성 확인은 다른 상호작용 유형과 달리 참여자의 문제 상황 인식이나 개념 세계를 수정하기 보다는 개념 세계와 모형을 확장하는 방식으로 모형구성에 기여할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 이를 위해서는 참여자들이 상이한 모형을 확인하는데 그치지 않고 모형의 양립가능성이 물리적으로 무엇을 의미하는가에 대한 개념적인 논의가 이어져야 한다. 그러나 본 연구의 결과는 이러한 논의가 늘 자발적으로 이뤄지지 않았음을 보여주고 있다. 따라서 양립성 확인에서 참여자들 간의 의미 있는 소집단 상호작용을 유도하기 위해 교수 방안이 요구된다.

5. 결론

5.1. 요약

뉴턴 역학은 물리학의 모든 다른 영역에서 적용되는 주요 도구를 정의하고 보편적인 방법을 제공한다는 점에서 물리 학습에서 매우 중요한 의미를 가진다. 고등학생들은 뉴턴 역학의 수학적 표현과 법칙의 적용 방법을 학습하기 위해 정량적인 문제해결을 주요 학습 전략으로 삼고 있다. 그러나 많은 학생들이 문제해결 과정을 통해 뉴턴 역학의 기본 원리를 이해하기 보다는 수학적 계산과정을 익히는데 주력하여 물리 이론에 관한 이해는 물론 흥미도 떨어지고 있는 실정이다.

이러한 학생들의 물리 문제해결에 관한 어려움을 극복하기 도입된 시도 중에서 동료와의 협업은 다양한 측면에서 그 효용성을 입증해왔다. 그러나 대다수의 연구들이 정량적인 검사 결과에 치중하여 학생들의 소집단 상호작용이 학습에 미치는 영향에 대한 질적인 분석은 부족하였다.

이에 본 연구는 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 동료와의 상호작용이 학생의 모형구성에 미치는 영향을 질적으로 탐색하여 학생의 학습에서 동료교수의 역할과 제한점에 대한 시사점을 제안하고자 한다. 이를 위해 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇이고, 문제해결을 위한 소집단 상호작용은 어떠한 양상으로 진행되며, 소집단 상호작용이 학생들의 모형구성에 미치는 영향은 어떠한지를 분석하였다

먼저 문헌 연구를 통해 뉴턴 역학의 문제해결에 관한 지식 구조를 정의하고, 모형구성의 관점에서 물리 문제해결을 재해석하여 모형구성의 분석틀을 제안하였다. 그리고 학생들의 소집단 상호작용을 문제 상황 인식, 개념 세계, 모형 세 요소로 세분화하여 소집단 상호작용이 모형구성에 미치는 영향을 심도 있게 기술하고자 하였다.

자료 수집을 위해 서울시에 소재한 일반계 고등학교의 남학생 32명을 대상으로 90분씩 2차시 동안의 동료교수 수업을 진행하였다. 고등학교 물리 I의 교육과정과 뉴턴 역학의 지식 구조를 반영하여 수업에서 사용할 12개의 문항을 개발하였다. 참여자들이 모둠별로 모여서 토론을 하는 장면은 캠코더를 이용하여 녹화되었으며, 총 95건의 담화가 전사되었다. 또한 참여자들이 작성한 활동지와 관찰 일지 등이 분석 자료로 활용되었다.

각 연구 문제에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

물리 문제에 대한 모형구성의 인지적 과정인 문제 상황 인식, 개념 세계 인출, 모형 생성 등의 하위 범주인 기술자 식별, 개념 모형 선택, 분면 형성, 수학적 조작 및 타당화로 분석틀을 구성하여 참여자들의 모형구성을 유형화하였다. 응답 I에서 총 12개 문항에 대한 372건의 모형구성 사례가 6가지 유형으로 범주화되었으며 각 유형은 다음과 같다. 모형의 모든 분면을 타당하게 구성(37.9%), 모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함(0.5%), 모든 분면을 구성하였으나 일부 분면의 타당성 결여(24.2%), 일부 분면만을 구성(11.6%), 부적절한 개념 모형 선택(4.0%), 직관이나 추측에 의한 해의 선택(14.5%) 등이다. 유형화가 불가능한 사례는 27건이었다. 각 문항별로 동일한 유형의 모형구성을 한 참여자들의 일관된 특징을 식별하여 모형구성에서의 어려움을 분석한 결과, 기술자 식별에서 참여자들은 문제 상황을 오인하거나 명시되지 않은 상호작용 기술자를 식별하는데 어려움을 겪고 있는 것으로 나타났다. 또한 일부 참여자들은 문제 상황과 개념 모형 간의 동질성에 대한 숙고 없이 익숙한 개념 모형을 임의로 선택하기도 하였다. 모형 생성 단계에서 참여자들은 계의 설정, 즉 대상과 동인의 구분에 대한 명확한 기준을 갖고 있지 않아 어떤 상호작용 기술자를 인과 분면 구성에 적용할 것인가에 대해 혼란스러워했다. 또한 모형구성의 각 단계에서 계의 설정을 달리 하는 경향도 확인할 수 있었다. 상태 분면 구성에서 일부 참여자들은 상태 기술자 간의 관계에 대한 공식을 떠올리지 못하거나 복잡

인 상황을 기술하는데 어려움을 보였다. 마지막으로 모형이 타당하지 않더라도 자신의 해가 보기에 있으면 참여자들은 자신의 모형이 타당하다고 판단하고 있음을 확인할 수 있었다.

뉴턴 역학 문제해결에 관한 어려움을 극복하기 위해 참여자들이 어떤 방식으로 상호작용 하는지를 기술하고자 참여자들의 소집단 상호작용을 유형화하였다. 소집단 상호작용은 대응된 모형의 수, 모듈원들의 역할, 개념 모형의 동질성, 모형의 변화를 기준으로 튜터링, 경쟁, 협업, 양립성 확인의 네 가지 유형으로 세분화되었다. 총 118건의 소집단 상호작용은 피교수자 역할을 하는 참여자가 교수자 역할을 하는 참여자의 모형을 일방적으로 수용하는 튜터링(54.2%), 상이한 구조의 모형을 생성한 참여자들이 대등한 입장에서 서로의 모형을 평가하고 합의를 시도하는 경쟁(17.8%), 문제 상황과 모형에 관한 정보를 공유함으로써 공동으로 모형을 수정하거나 새로운 모형의 구성을 시도하는 협업(10.1%), 대응된 모형을 구성한 참여자들이 모형들의 타당성을 인정하고 유사성과 차이점을 확인하는 양립성 확인(17.8%) 등의 양상으로 분류되었다. 튜터링은 대부분의 문항에서 가장 높은 빈도로 나타났으며 경쟁은 명시되지 않은 상호작용을 인식하고 복수의 대상을 계로 설정하는 문항에서 상대적으로 비중이 높았다. 협업은 가장 저조한 빈도를 보였으며 모형을 생성하지 못한 참여자들의 비중이 큰 문항에서 상대적으로 자주 관찰되었으며, 양립성 확인은 정답률이 높은 문항에서 비중이 컸다.

소집단 상호작용에서 문제 상황, 개념 세계 및 모형에 대한 상호작용이 참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 사례 분석하였다. A4가 A2나 A1을 대상으로 하는 튜터링에서 피교수자들은 교수자의 모형과 문제 상황 인식을 수용하는 과정을 통해 자신이 구성한 모형구성의 문제점을 인지하고 이를 수정하는 것으로 나타났다. 단, 피교수자의 타당하지 않은 모형구성 원인이 수학적 조작의 실수나 문제 상황에 대한 오인이 아니라 개념 세계의 결핍이나 모순에서 기인하는 경우 개념 세계 간의 상호작용이 뒷받침되어야 개념 세계의 보완이 가능한 것으로 확인되었다. 또한

선택된 개념 모형에 관한 개념 도식이 충분히 형성되지 않은 피교수자는 튜터링을 통해 자신의 개념 세계를 보완하지 못하고 모형의 결과만을 수용함으로써 일관된 모형구성에 실패하는 경우가 많았다.

경쟁에서 참여자들이 모형을 합의한 경우 튜터링과 유사한 형태로 모형구성 요소 간의 상호작용과 모형의 변화가 확인되었다. 그러나 참여자들의 역할이 더욱 적극적으로 자신의 모형과 문제 상황 인식, 개념 세계를 명시적으로 노출한다는 점에서 경쟁은 튜터링 보다 역동적이고 능동적으로 참여자의 모형구성에 기여한다고 볼 수 있다. 반면 경쟁에서 개념 세계에 대한 상호작용이 일어나지 않는 경우 참여자들은 합의에 이르지 않고 자신의 모형을 고수하여 모형구성의 의미 있는 변화를 관찰하기 어려웠다. 협업에서 A2 유형의 참여자들은 문제 상황 인식 간의 상호작용을 통해 기존 모형의 문제점을 찾고 이를 수정하였다. 그러나 개념 모형에 관한 개념 도식이 부족한 ID나 IG 유형의 참여자들의 경우 대부분 협업을 통해 모형을 생성해내지 못하였다. 따라서 협업이 모형구성에 기여할 수 있는 대상은 상당히 제한적임을 알 수 있었다. 마지막으로 양립성 확인은 다른 상호작용 유형과 달리 참여자의 문제 상황 인식이나 개념 세계를 수정하는 것이 아니라 개념 세계와 모형을 확장하는 방식으로 모형구성에 기여할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 양립성 확인의 이러한 가능성에도 불구하고 많은 참여자들이 다른 개념 모형을 선택한 모형을 확인만하고 개념 모형이나 모형의 양립성에 대한 심도 있는 논의를 진행하지 않았다.

5.2. 결론 및 제언

연구 결과를 종합하면 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 참여자들은 동료참여자의 문제 상황 인식 또는 모형을 수용, 평가, 공유하는 등의 소집단 상호작용을 통해 자신의 모형을 수정하거나 생성하는데 도움을 받는다고 할 수 있다. 그러나 개념 모형에 대한 참여자들의 이해가 현저히 부족하거나 개념적인 논의가 생략된 채 모형의 결과와 단편적인 지식만이 일방적으로 전달되면 소집단 상호작용은 단지 수학적 계산과정을 전수하는데 그칠 개연성이 높다. 이러한 양상의 문제해결 경험이 반복된다면 학생들은 물리 문제해결을 통해 물리 이론에 대한 이해의 폭을 넓혀가지 못한 채 수학적 계산과정에만 익숙해져갈 것이다.

이는 동료와의 상호작용이 학생들의 물리학습에 더욱 의미 있게 기여하기 위해서는 학생들이 동료의 모형구성을 수동적으로 수용하지 않고 적극적으로 질의 응답하여 모형과 개념 세계의 내적 연계성을 이해하는 것이 중요함을 시사한다. 즉, 모형의 수학적인 측면만이 아니라 모형이 기반하고 있는 개념 세계 요소들은 무엇이고, 어떤 개념 모형을 중심으로 조직되고 있으며, 문제 상황과의 연관성은 어떠한지를 이해해야 하는 것이다. 이를 위해 소집단 상호작용에서 학생들이 공식의 조합이나 계산 과정에만 주목하지 않고 과제의 물리적인 의미와 이론에 대해서도 논의하도록 하는 교수 방안이 요구된다고 할 수 있다.

구체적으로 교사가 학생들에게 개념 세계의 요소들이 과제의 문제 상황과 모형의 각 분면에 어떻게 연계되는지 논의하는 것에 대한 명시적인 지침을 제공하는 것도 하나의 방안으로 고려해볼 수 있다. 또한 학생들의 개념 세계를 보다 명확히 드러낼 수 있는 문항의 제작과 모둠 편성 방안들에 대한 세밀한 후속 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 곽영순. (2003). **질적연구로서 과학 수업비평: 수업비평의 이론과 실제**. 서울: 교육과학사.
- 교육과학기술부 (2011). **과학과 교육과정**. 교육과학기술부 고시 제 2011 - 361호. 별책 9.
- 권재술, & 이성왕. (1988). 물리문제해결 실패자(초심자)와 성공자(전문가)의 문제해결 사고과정에 관한 연구. **한국과학교육학회지**, 8(1), 43-55.
- 김종원, 김규환, 이지원, 황명수, & 김중복. (2012). 과학 교사 연수에서의 동료교수법의 효과및 교사의 인식. **과학교육연구지**, 36(1), 84-93.
- 김효남, & 노금자. (1996). 과학적 상황과 일상적 상황에 따른 초등학생들의 용해 개념. **초등과학교육**, 15(2), 233-250.
- 나장함. (2006). 질적 연구의 다양한 타당성에 대한 비교 분석 연구. **교육평가연구**, 19(1), 265-283.
- 류은희, 김중복, & 이정숙. (2012). 중학교 과학영재와 일반학생의 Peer Instruction 을 통한인지갈등: 문항의 난이도에 따른 비교를 중심으로. **영재교육연구**, 22(1).
- 박윤배. (1991). 역학 문제해결에 있어서의 오류 유형. **물리교육**, 9(1), 14-23.
- 박윤배, & 김미영. (2006). 협동해결과 개별해결에서 나타난 물리문제해결과정의 차이. **한국과학교육학회지**, 26(1), 114-121.
- 박학규, & 권재술. (1991). 물리 문제해결에 관한 최근 연구의 분석. **한국과학교육학회지**, 11(2),
- 박학규, & 이용현. (1993). 물리문제해결과정에서 중학생들의 사고과정의 특성 분석. **한국과학교육학회지**, 13(1), 31-47.

- 변태진. (2012). **House model을 이용한 학생들의 물리 문제해결 과정에 대한 이해**. 박사학위 논문. 서울대학교 대학원,
- 오필석. (2007). 연구논문 : 중등학교 지구과학 수업에서 과학적 모델의 활용 양상 분석: 대기 및 해양 지구과학 관련 수업을 중심으로. **한국과학교육학회지**, 27(7), 645-662.
- 이동욱. (2015). **중학생과 과학교사의 색 인식에 대한 개념세계 및 모형구성**. 박사학위 논문. 서울대학교 대학원,
- 이봉우, 김희경. (2006). 주제: 소외된 학생들을 위한 과학교육의 연구와 실천: 논문발표 2; 학생들이 물리를 재미없고 어렵다고 생각하는 이유에 대한 분석. **한국과학교육학회 학술발표 및 세미나집**, 67-77.
- 이신영, 김찬중, 최승언, 유준희, 박현주, 강은희, & 김희백. (2012). 소집단 상호작용에 따른 심장 내 혈액 흐름에 대한 소집단 모델 발달 유형과 추론 과정 탐색. **한국과학교육학회지**, 32(5), 805-822.
- 이지원, & 김중복. (2013). 과학영재들은 협업적 문제해결과정에서 무엇을 공유하는가? **영재교육연구**, 23(6), 1099-1115.
- 임준홍. (2014). **물리문제 풀이과정에서 나타나는 고등학교 학생들의 어려움 분석**. 박사학위 논문. 단국대학교 대학원.
- 장혜원. (2014). **한국의 인지적 숙련과 교육의 연계 연구**. 박사학위 논문, 한국교원대학교.
- 장혜원, & 김중복. (2017). 예비교사의 동료교수법 경험과 인식 탐구: 교양물리 사례를 중심으로. **한국교원교육연구**, 34(2), 311-334.
- 채동현. (2003). **과학 교육의 질적 접근**: 북스힐.
- Alexander, P. A., & Judy, J. E. (1988). The interaction of domain-specific and strategic knowledge in academic performance. *Review of Educational Research*, 58(4), 375.
- Alonzo, A. C., & Steedle, J. T. (2009). Developing and assessing a force and motion learning progression. *Science Education*,

93(3), 389–421.

- Angell, C., Guttersrud, Ø., Henriksen, E. K., & Isnes, A. (2004). Physics: Frightful, but fun. Pupils' and teachers' views of physics and physics teaching. *Science Education*, 88(5), 683–706.
- Bae, D., & Yoo, J. (2012). Middle School Students' Learning Progressions for Scientific Modeling Force and Motion. *New Physics: Sae Mulli*, 62(8), 809–825.
- Bing, T. J., & Redish, E. F. (2009). Analyzing problem solving using math in physics: Epistemological framing via warrants. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 5(2),
- Beichner, R. J. (1994). Testing student interpretation of kinematics graphs. *American Journal of Physics*, 62(8), 750–762.
- Bernardino Lopes, J., & Costa, N. (2007). The Evaluation of Modelling Competences: Difficulties and potentials for the learning of the sciences. *International Journal of Science Education*, 29(7), 811–851.
- Brewe, E. (2008). Modeling theory applied: Modeling Instruction in introductory physics. *American Journal of Physics*, 76(12), 1155–1160.
- Byun, T. I., & Lee, G. H. (2010). Toward understanding student difficulty in upper-level mechanics problem-solving processes. *The SNU Journal of Education Research*, 19, 145–165.
- Byun, T., & Lee, G. (2013). A New Approach to Physics Problem Solving by Focusing on the Development of the House Model. *New Physics: Sae Mulli*, 63(7), 745–755.
- Champagne, A. B., Klopfer, L. E., & Anderson, J. H. (1980). Factors

- influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics*, 48(12), 1074–1079.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50(1), 66–71.
- Clement, J., & Rea-Ramirez, M. A. (2008). *Model based learning and instruction in science*. New York : Springer.
- Cangelosi, J. S. (1990). *Designing tests for evaluating student achievement*. New York: Longman.
- Corben, H., & Stehle, P. (1960). *Classical mechanics*.(2nd ed.). New York: Wiley.
- Crouch, C. H., & Mazur, E. (2001). Peer instruction: Ten years of experience and results. *American Journal of Physics*, 69(9), 970–977.
- Damon, W., & Phelps, E. (1989). Critical distinctions among three approaches to peer education. *International journal of educational research*, 13(1), 9–19.
- de Ataíde, A. R. P., & Greca, I. M. (2013). Epistemic views of the relationship between physics and mathematics: Its influence on the approach of undergraduate students to problem solving. *Science & Education*, 22(6), 1405–1421.
- Duit, R., & Glynn, S. (1996). Mental modelling. *Research in science education in Europe*, 166–176.
- Enghag, M., Gustafsson, P., & Jonsson, G. (2007). From everyday life experiences to physics understanding occurring in small group work with context rich problems during introductory physics work at university. *Research in Science Education*, 37(4), 449–467.
- French, A. P. (1971). *Newtonian mechanics*. New York: W.W. Norton

& Company

- Galili, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 17(3), 371–387.
- Giere, R. N. (1990). *Explaining Science : A Cognitive Approach (Vol. Pbk. ed)*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gilbert, J., & Watts, D. M. (1983). Concepts, Misconceptions and Alternative Conceptions: Changing Perspectives in Science Education. *Studies in Science Education*, 10, 61–98.
- Gilbert, J. K., Pietrocola, M., Zylbersztajn, A., & Franco, C. (2000). Science and education: Notions of reality, theory and model Developing models in science education. In J. K. Gillbert, C. J. Boilter (Eds.) *Developing Models in Science Education* (pp.19–40). London : Kluwer Academic Publisher
- Gilbert, John K. (2005). Visualization: *A metacognitive skill in science and science education Visualization in science education* (pp. 9–27). Dordrecht.: Springer.
- Greca, I. M., & Moreira, M. A. (2002). Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. *Science Education*, 86(1), 106–121.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53(11), 1056–1065.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1987). Modeling instruction in mechanics. *American Journal of Physics*, 55(5), 455–462.
- Halloun, I. A. (2006). *Modeling theory in science education* (Vol. 24). Dordrecht: Springer.
- Halloun, I. A. (2007). Mediated modeling in science education. *Science & Education*, 16(7), 653–697.

- Hammer, D. (1994). Epistemological beliefs in introductory physics. *Cognition and Instruction*, 12(2), 151-183.
- Harrison, A. G., & Treagust, David F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011-1026.
- Heller, P., Keith, R., & Anderson, S. (1992). Teaching problem solving through cooperative grouping. Part 1: Group versus individual problem solving. *American Journal of Physics*, 60(7), 627-636.
- Henderson, C., Yerushalmi, E., Kuo, V. H., Heller, P., & Heller, K. (2004). Grading student problem solutions: The challenge of sending a consistent message. *American Journal of Physics*, 72(2), 164-169.
- Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*, 55(5), 440-454.
- Hestenes, D., & Wells, M. (1992). A Mechanics baseline test. *The Physics Teacher*, 30(3), 159-166.
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141-158.
- Hofer, B. K. (2001). Personal epistemology research: Implications for learning and teaching. *Educational Psychology Review*, 13, 353 - 382.
- Hogan, K., Nastasi, B. K., & Pressley, M. (1999). Discourse Patterns and Collaborative Scientific Reasoning in Peer and Teacher-Guided Discussions. *Cognition and Instruction*, 17(4), 379 - 432.
- Hsu, L., Brewe, E., Foster, T. M., & Harper, K. A. (2004). Resource Letter RPS-1: Research in problem solving. *American Journal of Physics*, 72(9), 1147-1156.

- James, M. C., & Willoughby, S. (2011). Listening to student conversations during clicker questions: What you have not heard might surprise you! *American Journal of Physics*, 79(1), 123-132.
- Jang, H., Lasry, N., Miller, K., & Mazur, E. (2017). Collaborative exams: Cheating? Or learning? *American Journal of Physics*, 85(3), 223-227.
- Jeon, C., Lee, G., & Park, J. (2010). Student Difficulty in Learning Motion of a Particle in One Dimension in Upper-Level Mechanics: Focusing on the Sources and Resolutions of the Difficulties. *New Physics: Sae Mulli*, 60(11), 1185-1197.
- Jho, H. (2014). Literature Review of Students' Difficulties in Learning the Theory of Relativity. *New Physics: Sae Mulli*, 64(3), 281-289.
- Ji, Y., Cheong, Y. W., & Song, J. (2016). Characteristics of Undergraduate Students' Problem Solving the Law of Conservation in Mechanics with a Focus on Understanding the System. *New Physics: Sae Mulli*, 66(4), 422-433.
- Jin, S., & Yoo, J. (2014). Physics Majors' Perceptions of the Usefulness of Majoring in Physics for the Workplace. *New Physics: Sae Mulli*, 64(1), 35-45.
- Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387.
- Karam, R. A. S. (2014). Framing the structural role of mathematics in physics lectures: A case study on electromagnetism. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 10(1),

010119.

- Kim, E., & Pak, S.-J. (2002). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *American Journal of Physics*, 70(7), 759–765.
- Kim, H. K., & Lee, B. W. (2006). Why Do Secondary Students Perceive Physics is Uninteresting and Difficult? *New Physics: Sae Mulli*, 52(6), 521–529.
- Kohl, P. B., & Finkelstein, N. D. (2008). Patterns of multiple representation use by experts and novices during physics problem solving. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 4(1), 010111.
- Larkin, J. H., & Reif, F. (1979). Understanding and teaching problem solving in physics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 191–203.
- Lasry, N., Mazur, E., & Watkins, J. (2008). Peer instruction: From Harvard to the two-year college. *American Journal of Physics*, 76(11), 1066–1069.
- Lee, I., & Yoo, J. (2017). How Does Peer Instruction Contribute to Learning Advancement in Solving Problems Involving Newton's Second Law? *New Phys.: Sae Mulli*, 67(11), 1327–1341.
- Lim, J., & Lee, B. (2015). Analysis of High School Students' Difficulties Related to Procedural Knowledge in Solving Classical Mechanics Problems. *New Physics: Sae Mulli*, 65(9), 888–899.
- McDaniel, M. A., Stoen, S. M., Frey, R. F., Markow, Z. E., Hynes, K. M., Zhao, J., & Cahill, M. J. (2016). Dissociative conceptual and quantitative problem solving outcomes across interactive

- engagement and traditional format introductory physics. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 12(2), 020141.
- Maloney, D. P. (1994). Research on problem solving: Physics, In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 327-354). New York : MacMillan.
- Mason, A., & Singh, C. (2010). Helping students learn effective problem solving strategies by reflecting with peers. *American Journal of Physics*, 78(7), 748-754.
- Mazur, E. (1997). *Peer instruction : a user's manual*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- National Research Council. (1996). *National Science Education Standards*. Washington, DC: National Academy Press.
- Nersessian, N. J. (1995). Should physicists preach what they practice? *Science & Education*, 4(3), 203-226.
- Nersessian, N. J. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. *Model-based reasoning in scientific discovery* (pp. 5-22). New York: Springer.
- Nguyen, D.-H., & Rebello, N. S. (2011). Students' difficulties with integration in electricity. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 7(1), 010113.
- Niss, M. (2012). Towards a conceptual framework for identifying student difficulties with solving Real-World Problems in Physics. *Latin-American Journal of Physics Education*, 6(1).
- Niss, M. (2017). Obstacles Related to Structuring for Mathematization Encountered by Students when Solving Physics Problems. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15(8), 1441-1462.

- Osborne, J. (1990). Sacred cows in physics – Towards a redefinition of physics education. *Physics Education*, 25, 189–196.
- Pepper, R. E., Chasteen, S. V., Pollock, S. J., & Perkins, K. K. (2012). Observations on student difficulties with mathematics in upper-division electricity and magnetism. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 8(1), 010111.
- Redish, E. F., Saul, J. M., & Steinberg, R. N. (1998). Student expectations in introductory physics. *American Journal of Physics*, 66(3), 212–224.
- Redish, E. F. (2006). *Problem solving and the use of math in physics courses*. Paper presented at Meeting of International Commission on Physics Education, Delhi, India.
- Redish, E. F., & Bing, T. J. (2009). *Using math in physics: Warrants and epistemological frames*. In D. Raine, C. Hurkett & L. Rogers (Eds.) *Physics community and cooperation*, Vol. 2. GIREP-EPEC & PHEC 2009 international conference, University of Leicester, Leicester , UK.
- Reif, F., & Heller, J. I. (1982). Knowledge structure and problem solving in physics. *Educational Psychologist*, 17(2), 102–127.
- Sawrey, B. A. (1990). Concept learning versus problem solving: Revisited. *Journal of Chemical. Education*, 67(3), 253.
- Schell, J., Lukoff, B., & Mazur, E. (2013). Catalyzing Learner Engagement using Cutting-Edge Classroom Response Systems in Higher Education. In *Increasing Student Engagement and Retention Using Classroom Technologies: Classroom Response Systems and Mediated Discourse Technologies* (pp. 233–261). Emerald Group Publishing Limited.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A.,

- Fortus, D., Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.
- Sherin, B. (2006). Common sense clarified: The role of intuitive knowledge in physics problem solving. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(6), 535-555.
- Simon, H. A., & Newell, A. (1971). Human problem solving: The state of the theory in 1970. *American Psychologist*, 26(2), 145.
- Smith, M. K., Wood, W. B., Adams, W. K., Wieman, C., Knight, J. K., Guild, N., & Su, T. T. (2009). Why peer discussion improves student performance on in-class concept questions. *Science*, 323(5910), 122-124.
- Stanic, G. M., & Kilpatrick, J. (1988). Historical perspectives on problem solving in the mathematics curriculum. In R. I. Charles & E. A. Silver (Eds.) *The teaching and assessing of mathematical problem solving* (Vol.3, p.1-22). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Tuminaro, J., & Redish, E. F. (2007). Elements of a cognitive model of physics problem solving: Epistemic games. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 3(2), 020101.
- Uhden, O., Karam, R., Pietrocola, M., & Pospiech, G. (2012). Modelling mathematical reasoning in physics education. *Science & Education*, 21(4), 485-506.
- Van Heuvelen, A. (1991). Learning to think like a physicist: A review of research based instructional strategies. *American Journal of Physics*, 59(10), 891-897.
- Watkins, J., & Mazur, E. (2010). Just in time teaching and peer

- instruction. In Scott, S. & Mark, M. (Eds.), *Just in Time Teaching: Across the Disciplines, and Across the Academy*. (pp.39-62). Sterling, VA: Stylus Publishing.
- Wood, A. K., Galloway, R. K., Hardy, J., & Sinclair, C. M. (2014). Analyzing learning during Peer Instruction dialogues: A resource activation framework. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 10(2). 020107.

부 록

[부록] 활동지

1. 질량이 1kg 인 물체가 지면으로부터 높이 h 인 지점에서 자유 낙하하여 지면과 충돌하는데 1초 걸렸다. 지면으로부터의 높이가 $2h$ 인 지점에서 질량이 2kg 인 물체가 자유 낙하할 때 물체가 지면과 충돌하는데 걸리는 시간은? (단, 공기와의 마찰은 무시하며, 중력가속도는 10m/s^2 이다.)
A. 1초 B. $\sqrt{2}\text{초}$ C. 2초 D. $2\sqrt{2}\text{초}$ E. 4초

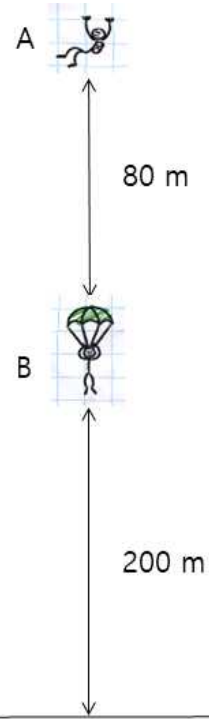
※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요

2. 그림은 공중에서 낙하하고 있는 두 사람을 나타낸 것이다. A는 어떠한 장비도 없이 자유낙하하고 있으며 B는 낙하산을 펴서 10m/s의 일정한 속력으로 낙하하고 있다.

A와 B 사이의 거리가 80m인 순간 A의 속력은 10m/s이고 B와 지면 사이의 거리는 200m이다. A와 B는 지면으로부터 몇 미터 상공에서 충돌하겠는가? (단, A에 작용하는 공기의 마찰력은 무시하며, 중력가속도는 10m/s^2 이다.)

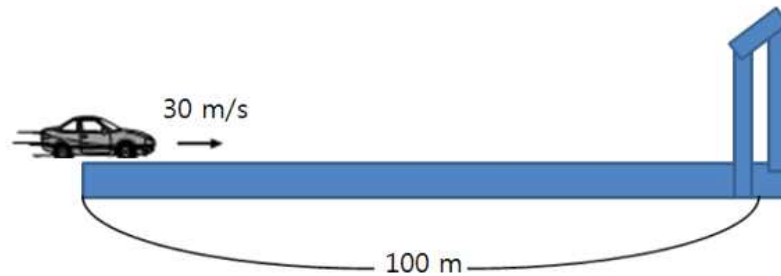
A. 40m B. 80m C. 100m D. 120m E. 160m



※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요

3. 그림은 직선 모양의 고속도로에서 30m/s의 일정한 속도로 달리고 있는 자동차의 운전자가 100m 전방에 있는 하이패스를 발견한 순간을 나타낸 것이다. 하이패스의 제한 속도는 10m/s이며 자동차의 질량은 1,000kg이다.



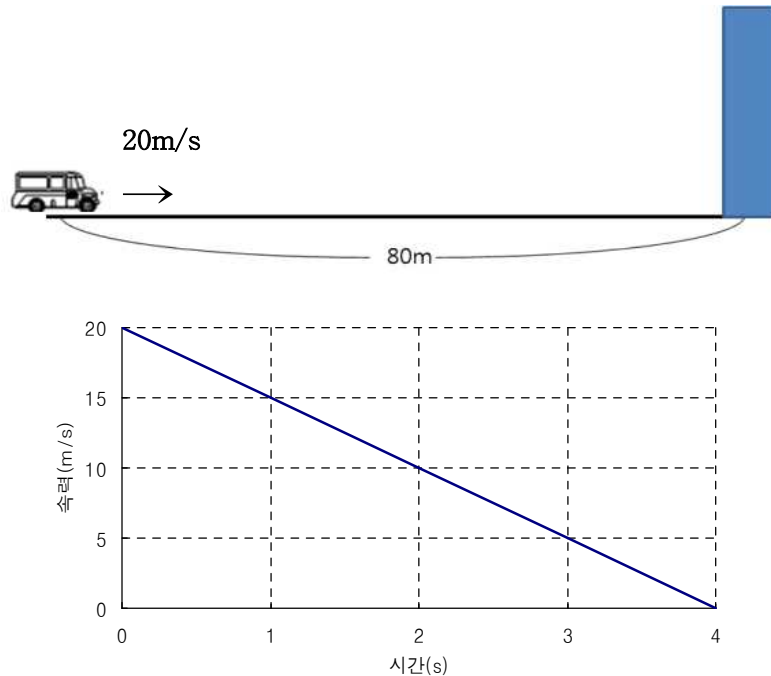
이 자동차의 브레이크가 낼 수 있는 최대 마찰력이 10,000N이라고 한다. 자동차가 하이패스를 10m/s의 속도로 통과하기 위해서는 하이패스를 발견한 순간부터 적어도 몇 초 안에 브레이크를 작동시켜야 하는가? (단, 브레이크가 작동하고 있는 동안 자동차에 작용하는 마찰력의 크기는 일정하며 자동차의 크기는 무시한다.)

A. 0초 B. 0.5초 C. 1초 D. 1.5초 E. 2초

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요

4. 그림은 물기가 없는 직선 도로에서 20m/s로 달리던 자동차가 전방 80m에 있는 벽을 발견한 순간을 나타낸 것이다. 운전자는 벽을 발견한 순간 브레이크를 밟아 자동차의 속력을 줄이기 시작했으며 그래프는 시간에 따른 자동차의 속력을 나타낸 것이다.



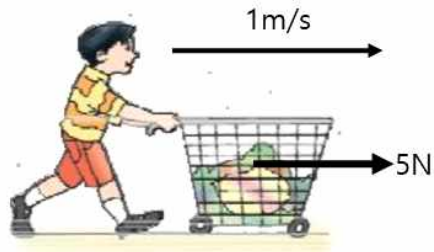
비가 오면 도로와 자동차 사이의 마찰력은 20% 감소한다고 한다. 비가 오는 날 위와 같은 상황이 벌어진다면 자동차는 벽으로부터 몇 m 떨어진 지점에서 멈추게 되는가? (단, 브레이크가 작동하고 있는 동안에 자동차에 작용하는 마찰력의 크기는 일정하며 자동차의 크기는 무시한다.)

A. 10m B. 20m C. 30m D. 40m E. 50m

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

5. 철수가 수평면에서 질량이 20kg인 카트를 5N의 힘으로 밀고 있다. 이때 카트는 1m/s의 일정한 속력으로 움직이고 있다.



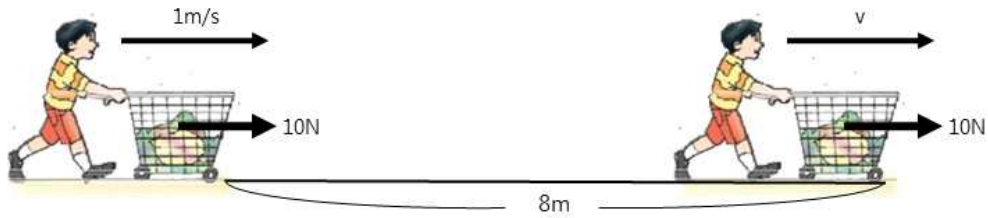
철수가 갑자기 카트에서 손을 떼어 더 이상 힘을 작용하지 않는다면 손을 떼는 순간부터 2초 뒤에 카트의 속력은? (단, 공기와의 마찰은 무시한다.)

A. 0m/s B. 0.2m/s C. 0.5m/s D. 0.8m/s E. 1.0m/s

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

6. 5번 문제의 초기 상황에서 철수가 카트 미는 힘을 10N으로 증가시켜 8m 밀었을 때 카트의 속도 v 는? (단, 공기와의 마찰은 무시하며 카트의 질량은 20kg이다.)

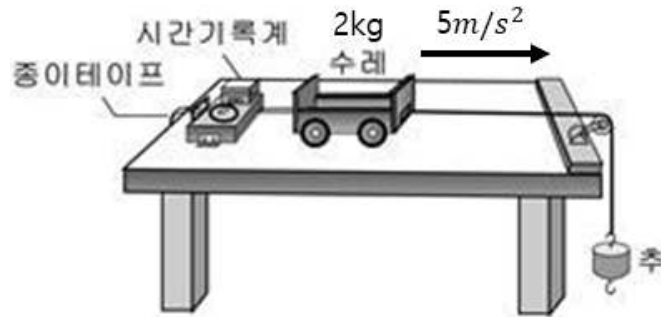


- A. $\sqrt{2}$ m/s B. $\sqrt{3}$ m/s C. 2m/s D. $\sqrt{5}$ m/s E. $\sqrt{7}$ m/s

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

7. 그림은 실험대 위에 시간기록계와 질량 2kg 인 역학용 수레, 고정 도르래를 장치하고 질량 1kg 인 추를 여러 개 매달아 수레의 가속도를 구하는 실험이다.



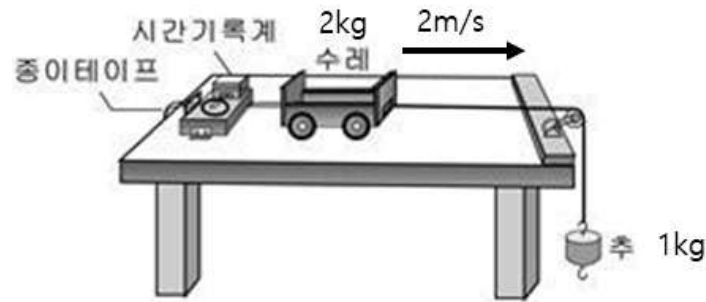
수레의 가속도가 5m/s^2 로 측정되었을 때 도르래에 매달린 추의 총 개수는?
(단, 모든 마찰은 무시하며 중력가속도는 10m/s^2 이다.)

A. 1개 B. 2개 C. 3개 D. 4개 E. 5개

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

8. 그림은 실험대 위에 시간기록계와 질량 2kg인 역학용 수레, 고정 도르래를 장치하고 질량 1kg인 추 1개를 연결한 상태를 나타낸 것이다. 수레는 현재 오른쪽으로 2m/s의 속도로 움직이고 있으며, 수레에 작용하는 마찰력의 크기는 1N이다.



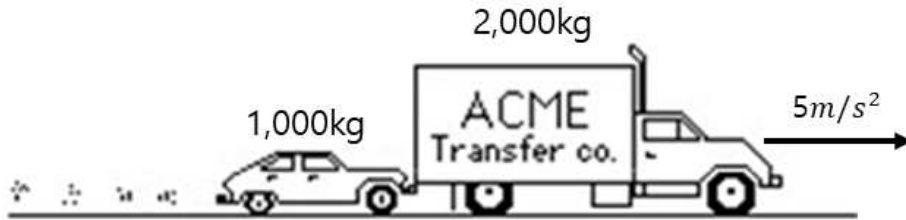
3초 뒤 수레의 속력은? (단, 공기와 도르래에서의 마찰은 무시하며, 중력가속도는 10 m/s^2 이다. 또한 실험대는 수레가 떨어지지 않을 정도로 충분히 길다고 가정한다.)

A. 5 m/s B. 8 m/s C. 11 m/s D. 12 m/s E. 17 m/s

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

9. 그림은 소형차가 고장 난 트럭을 오른쪽으로 밀고 있는 것을 나타낸 것이다. 소형차의 질량은 $1,000\text{kg}$ 이고 트럭의 질량은 $2,000\text{kg}$ 이다.



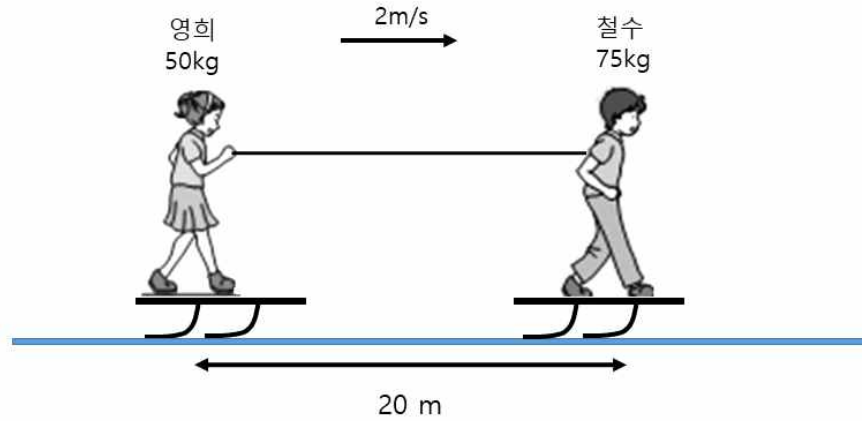
소형차와 트럭의 가속도가 5m/s^2 일 때 트럭이 소형차를 뒤로 미는 힘의 크기는? (단, 공기와 도로와의 마찰은 무시하고 두 자동차 사이에 작용하는 힘만 고려한다.)

A. 0N B. $5,000\text{N}$ C. $10,000\text{N}$ D. $15,000\text{N}$ E. $20,000\text{N}$

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

10. 그림은 철수와 영희가 줄로 연결된 상태로 빙판 위에서 썰매 타는 모습을 나타낸 것이다. 영희의 몸무게는 50kg, 철수의 몸무게는 75kg이며 오른쪽으로 2m/s의 속도로 움직이고 있다.



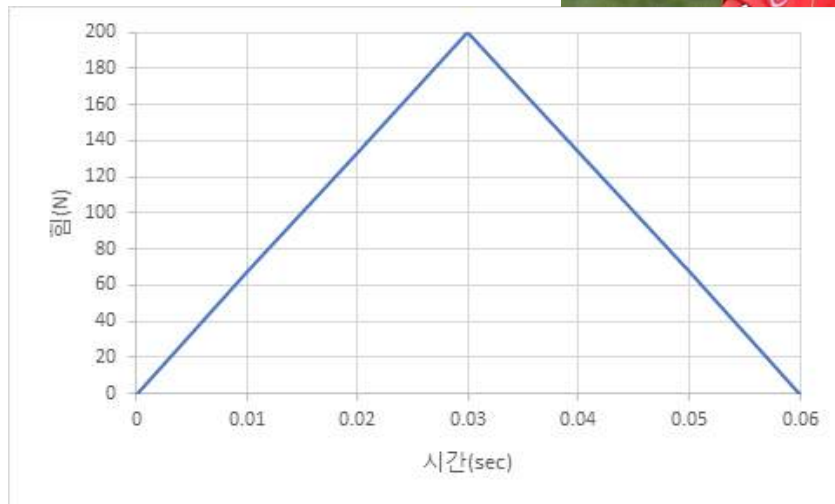
영희가 철수를 75N의 힘으로 왼쪽으로 계속 잡아당기면 둘은 몇 초 후에 만나겠는가?(단, 모든 마찰은 무시하며 사람의 몸 크기는 고려하지 않는다.)

A. 4초 B. $2\sqrt{5}$ 초 C. 5초 D. $\sqrt{30}$ 초 E. $2\sqrt{10}$ 초

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

11. 사진은 축구선수가 날아오는 공을 헤딩하는 장면을 포착한 것이다. 아래의 그래프는 축구선수가 공에 작용하는 힘을 시간에 따라 나타낸 것이다. 축구공의 질량은 0.5kg이다.



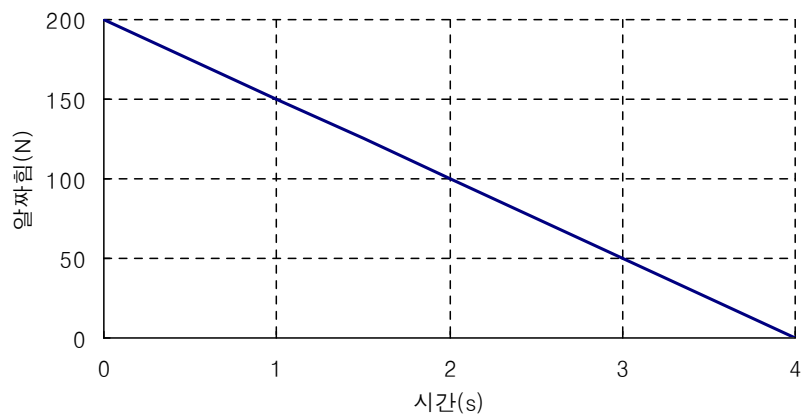
축구공이 축구선수와 충돌하기 직전의 속력이 8m/s일 때 축구공이 축구선수의 머리로부터 튕겨 나가는 순간의 속력은?

- A. 1 m/s B. 2 m/s C. 3 m/s D. 4 m/s E. 5 m/s

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

12. 그림의 자이로드롭은 자유 낙하하다가 지면으로부터 일정 높이에 도달하면 브레이크가 작동하여 안전하게 바닥에 도착하는 놀이기구이다. 그래프는 자이로드롭의 브레이크가 작동하기 시작하는 순간부터 자이로드롭이 바닥에 도착하여 멈출 때까지 탑승객인 영희에 작용하는 알짜힘의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. 영희의 몸무게는 50kg이다.



자이로드롭이 최고점에서 자유 낙하를 시작하여 브레이크가 작동할 때까지 걸리는 시간은? (단, 공기와의 마찰은 무시하며 중력가속도는 10 m/s^2 이다.)

A. 0.4초 B. 0.8초 C. 1.2초 D. 1.6초 E. 2초

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

Abstract

An Analysis of High School Students' Modeling and Small Group Interactions during Peer Instruction in Solving Mechanics

Lee, Il

Physics Education

The Graduate School

Seoul National University

Peer Instruction have been reported to contribute to students' concept change and achievement through several years of quantitative research. However, some researchers doubted that the positive effects of peer instruction were due to the unilateral transmission about the correct answer and interpretation, and that there is a need for qualitative research to reveal these issues. Recently, modeling theory in science teaching and learning provide a more qualitative view by understanding that solving the physical problems is a process of constructing system of explaining the problem

situations in the conceptual world. In particular, mechanics is a suitable subject to analyze from the viewpoint of modeling in terms of describing and predicting the motion of objects through a mathematical organization of various concepts and laws.

The purpose of this study is to suggest the implications of peer instruction's role and limitations in students' learning by qualitatively exploring the influence of peer interaction through modeling on mechanics problem solving activities. This study analyzed the difficulties of high school students in modeling the mechanics problem, the students' interaction during problem solving, and the effect of small group interactions on modeling.

A total of 32 high school students in Seoul were given 90-minute lessons twice. Twelve multiple choice items were constructed considering the Newtonian knowledge structure and Physics I curriculum. Participants individually solved the problem in the class and submitted the responses with classroom response system (Response I). The teacher grouped the students and made sure that a group has students with different responses. The participants discussed and submitted the individual responses (Response II). Peer discussions were recorded and 95 discourses were transcribed. Worksheets, transcripts and observation logs were utilized to ensure the validity of the analysis.

Participants' modeling were categorized by frameworks such as descriptor identification, conceptual model selection, facets formulation, mathematical manipulation, and validation which has subcategories problem cognition, conceptual world retrieval, and model generation. In Response I, 372 cases of modeling for 12 items were categorized into 6 types: valid facets (37.9%), valid facets but failed mathematical manipulation (0.5%), all facets formulated but some facets lacking validity (24.2%), facets partially formulated (11.6%), inadequate conceptual model selection (4.0%), and choosing answer by intuition or guess (14.5%). There were 27 cases that could not be categorized due to lack of further information. Participants showed difficulty in identifying interaction descriptors or applying certain interaction descriptors to causal facets after analyzing the difficulties on modeling by identifying consistent features of participants with same type of model for each item. In addition, some participants randomly selected

familiar conceptual models without considering the problem situation, or applied different system settings to each step of modeling.

According to the number of the correspondent models, the role of the group members, the homogeneity of the model, and the change of the model in the group, the small group interactions were categorized into four patterns such as tutoring, competition, cooperation, and compatibility. A total of 118 small group interactions were tutoring (54.2%) in which the tutee unilaterally accepts the model of the tutor, competition (17.8%) in which participants who generated different models evaluate each other's models, cooperation (10.1%) in which participants modify the model jointly by sharing information on problem situations and models or attempting to construct new models, and compatibility (17.8%) in which participants identify model similarities and differences between correspondent models.

Finally, the effect of small group interaction to participants' modeling especially on problem situation recognition, conceptual world and model was analyzed. Participants in the tutoring and competition were found to recognize the model or to correct the problem situation recognition in the process of accepting or evaluating the peer's model. However, if a participant with deficit or contradiction on the conceptual world passively accepted only the resultant model of the peer without interaction in the conceptual world, then it appeared that the internal consistency between problem situation recognition, conceptual world, and the model was lacking. Cooperation had different effects on modeling according to group characteristics. If there were correspondent model generating participants in the group, then the group shared the problem situation recognition and modified the existing model. However, in the case wherein the group was only composed of the participants who could not generate the correspondent model, the model generation and the solution failed in most cases. In the compatibility, the groups which participants only check the others' model without conceptual discussion about the similarity and the difference of the model were more than 75%. It can be interpreted that most participants did not experience the expansion of model and conceptual world in compatibility. In conclusion, peer instruction activities can help students to modify or create their own models through small group interaction such as accepting,

evaluating, and sharing the problem situation recognition or peer models. However, if either the participants' understanding of the conceptual model is insufficiently understood or the conceptual interactions are omitted, then only the result of the model and the fragmentary knowledge are unilaterally transmitted, and the small group interaction is likely to only transfer mathematical calculation processes. Thus, it is important to understand the link between the model and the conceptual world through active interactions in order for peer instruction activities to meaningfully contribute to students' learning of physics. Further research is needed to encourage students not only pay attention to the combination of formulas and calculations but also to discuss the physical meaning and theories of their work.

**keywords : Physical problem solving, Modeling, Small group
interaction, Mechanics**

Student Number : 2012-30408



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

교육학박사 학위논문

역학 문제해결에 대한
동료교수 활동에서 고등학생의
모형구성 및 소집단 상호작용 분석

An Analysis of High School Students'
Modeling and Small Group Interactions
during Peer Instruction
in Solving Mechanics Problems

2018년 2월

서울대학교 대학원
과학교육과 물리전공
이 일

역학 문제해결에 대한
동료교수 활동에서 고등학생의
모형구성 및 소집단 상호작용 분석

지도교수 유 준 희

이 논문을 교육학박사 학위논문으로 제출함
2018년 1월

서울대학교 대학원
과학교육과 물리전공
이 일

이 일의 박사 학위논문을 인준함
2018년 1월

위 원 장 이 경 호 (인)

부위원장 조 광 희 (인)

위 원 최 승 언 (인)

위 원 채 승 철 (인)

위 원 유 준 희 (인)

국문초록

동료교수는 다년간의 양적 연구를 통해 학생들의 개념 변화와 성취도 향상에 기여하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 일각에서는 동료교수의 긍정적인 효과는 일방적인 정답과 풀이의 전수 때문이라는 의구심을 품고 있으며, 이러한 쟁점을 밝히기 위한 질적 연구의 필요성이 제기되고 있다. 최근에 대두되는 과학교수학습 방법으로써 모형구성은 학습자가 개념 세계를 활용하여 문제 상황의 설명 체계를 구성하는 과정으로 물리 문제해결을 이해함으로써 보다 질적인 관점을 제공할 수 있다. 특히, 역학은 여러 개념과 법칙들을 수학적으로 조직하여 물체의 운동을 기술하고 예측한다는 점에서 모형구성 관점으로 분석하기에 적합한 영역이다.

이에 본 연구는 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 동료와의 상호작용이 학생의 모형구성에 미치는 영향을 질적으로 탐색하여 학생의 학습에서 동료교수의 역할과 제한점에 대한 시사점을 제안하고자 한다. 이를 위해 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇이고, 문제해결을 위한 소집단 상호작용은 어떠한 양상으로 진행되며, 소집단 상호작용이 학생들의 모형구성에 미치는 영향은 어떠한지를 분석하였다.

서울시에 소재한 일반계 고등학교의 남학생 32명을 대상으로 물리 I 교육과정과 뉴턴 역학의 지식 구조를 고려하여 제작한 12개 선다형 문항에 대한 동료교수 수업을 90분씩 2차시 동안 진행하였다. 수업에서 참여자들은 먼저 개별적으로 문제를 풀고 교실응답시스템(Classroom Response System)에 접속하여 교사에게 답을 전송한다(응답 I). 교사가 가급적 답이 다른 참여자들로 모둠을 편성하여 고지하면 학생들은 모둠별로 모여 토론한 뒤 개별적으로 답을 전송한다(응답 II). 참여자들은 자신의 문제풀이 과정을 활동지에 기록하였으며, 95 사례의 담화가 녹화 후 전사되었다. 분석의 타당성을 확보하기 위해 전사 자료, 활동지, 관찰 일지 등이 활용되었다.

물리 문제에 대한 모형구성의 인지적 과정인 문제 상황 인식, 개념 세계 인출, 모형 생성 등의 하위 범주인 기술자 식별, 개념 모형 선택, 분면 형성, 수학적 조작 및 타당화로 분석틀을 구성하여 참여자들의 모형구성을 유형화하였다. 응답 I 에서 총 12개 문항에 대한 372건의 모형구성 사례가 6가지 유형으로 범주화되었으며 각 유형은 다음과 같다. 모형의 모든 분면을 타당하게 구성(37.9%), 모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함(0.5%), 모든 분면을 구성하였으나 일부 분면의 타당성 결여(24.2%), 일부 분면만을 구성(11.8%), 부적절한 개념 모형 선택(3.8%), 직관이나 추측에 의한 해의 선택(14.5%) 등이다. 유형화가 불가능한 사례는 27건이었다. 각 문항별로 동일한 유형의 모형구성을 한 참여자들의 일관된 특징을 식별하여 모형구성에서의 어려움을 분석한 결과, 참여자들은 상호작용 기술자를 식별하거나 어떤 상호작용 기술자를 인과 분면 구성에 적용할 것인가에 대한 어려움을 노출하였다. 또한 일부 참여자들은 문제 상황에 대한 숙고 없이 익숙한 개념 모형을 임의로 선택하거나 모형구성의 각 단계마다 계의 설정을 달리 적용하는 것으로 나타났다.

동료교수에서 참여자들의 소집단 상호작용을 모둠 내에 대응된 모형을 구성한 모둠원의 수, 모둠원의 역할, 모형의 동질성, 모형의 변화 등의 측면에서 분석한 결과, 튜터링, 경쟁, 협업 및 양립성 확인의 네 가지 양상으로 범주화하였다. 총 118건의 소집단 상호작용은 피교수자 역할을 하는 참여자가 교수자 역할을 하는 참여자의 모형을 일방적으로 수용하는 튜터링(54.2%), 상이한 구조의 모형을 생성한 참여자들이 대등한 입장에서 서로의 모형을 평가하고 합의를 시도하는 경쟁(17.8%), 문제 상황과 모형에 관한 정보를 공유함으로써 공동으로 모형을 수정하거나 새로운 모형의 구성을 시도하는 협업(10.1%), 대응된 모형을 구성한 참여자들이 모형들의 타당성을 인정하고 유사성과 차이점을 확인하는 양립성 확인(17.8%) 등의 양상으로 분류되었다.

마지막으로 문제 상황, 개념 세계 및 모형에 대한 소집단 상호작용이

참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 사례 분석하였다. 튜터링과 경쟁의 참여자들은 동료의 모형을 수용하거나 평가하는 과정에서 본인의 모형과 문제 상황 인식의 문제점을 인지하고 이를 수정하는 것으로 확인되었다. 그러나 개념 세계의 결핍이나 모순을 가진 참여자가 개념 세계에 대한 상호작용 없이 동료의 결과적 모형만을 수동적으로 수용할 경우 문제 상황 인식, 개념 세계 및 모형의 내적 일관성이 결여되는 것으로 나타났다. 협업은 모두의 특성에 따라 모형구성에 미치는 영향이 상이하였다. 모두 내에 모형을 생성한 참여자가 있는 경우 모두원들은 문제 상황 인식을 공유하여 기존의 모형을 수정하였다. 그러나 모형을 생성하지 못한 참여자들로만 모두가 편성된 경우 대부분의 사례에서 모형 생성과 해의 도출에 실패하였다. 양립성 확인에서 참여자들이 모형의 유사성과 차이에 대한 개념적 논의보다는 상대방의 모형을 확인하는데 그친 경우가 해당 양상의 75%가 넘었다. 이는 대부분의 참여자들이 양립성 확인을 통해 모형과 개념 세계의 확장을 경험하지 못한 것으로 해석할 수 있다.

결론적으로 동료교수 활동에서 참여자들은 동료 참여자의 문제 상황 인식 또는 모형을 수용, 평가, 공유하는 등의 소집단 상호작용을 통해 자신의 모형을 수정하거나 생성하는데 도움을 받는다고 할 수 있다. 그러나 개념 모형에 대한 참여자들의 이해가 현저히 부족하거나 개념적인 논의가 생략된 채 모형의 결과와 단편적인 지식만이 일방적으로 전달되면, 소집단 상호작용은 단지 수학적 계산과정을 전수하는데 그칠 개연성이 높다. 이는 동료교수 활동이 학생들의 물리학습에 더욱 의미 있게 기여하기 위해서는 능동적인 상호작용을 통해 모형과 개념 세계의 연계성을 이해하는 것이 중요함을 시사한다. 동료교수 활동 중 학생들이 공식의 조합과 계산과정에만 주목하지 않고 과제의 물리적인 의미와 이론에 대해서도 논의하도록 격려하는 교수 방안에 대한 추후 연구가 필요하다.

주요어 : 물리 문제해결, 모형구성, 소집단 상호작용, 역학

학 번 : 2012-30408

목 차

초 록	i
목 차	iv
표 목차	vii
그림 목차	ix
1. 서론	1
1.1. 연구의 배경	1
1.2. 연구의 목적	4
1.3. 연구과정의 개요	5
1.4. 용어의 정의	7
1.4.1. 역학	7
1.4.2. 개념 세계	7
1.4.3. 모형	8
1.4.4. 모형구성	8
1.4.5. 동료교수	10
1.4.6. 소집단 상호작용	10
1.5. 연구의 한계	11
2. 선행 연구와 이론적 논의	13
2.1. 뉴턴 역학	13
2.1.1. 뉴턴 역학의 규칙	13
2.1.2. 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조	19
2.1.3. 중등 교육과정의 뉴턴 역학	25
2.2. 물리 문제해결	30

2.2.1. 물리 문제해결의 의의	30
2.2.2. 물리 문제해결에서 학생들이 겪는 어려움	32
2.3. 모형구성	40
2.3.1. 모형(Model)과 모형구성	40
2.3.2. 모형구성과 물리 문제해결	45
2.3.3. 모형구성의 분석틀	51
2.4. 동료교수와 소집단 상호작용	67
2.4.1. 동료교수	66
2.4.2. 물리 문제해결에서 동료교수의 효용성	68
2.4.3. 소집단 상호작용의 양상	70
3. 연구 방법	77
3.1. 연구 대상	77
3.2. 수업의 구성	78
3.2.1 수업의 흐름	78
3.2.2. 문항의 제작	79
3.2.3. 문항 정답률	86
3.2.4 모둠의 정답 분포 변화	87
3.3. 자료 수집	90
3.4 자료 분석	91
3.4.1. 모형구성의 분석틀	91
3.4.2. 소집단 상호작용 양상 분류	92
3.4.3. 소집단 상호작용이 모형구성에 미치는 영향	94
4. 결과 및 논의	96
4.1. 모형구성의 유형과 어려움	96
4.1.1. 모형구성 유형	96
4.1.2. 모형구성에서 학생들의 어려움	110

4.2. 소집단 상호작용의 양상	136
4.2.1. 소집단 상호작용의 양상 분류	136
4.2.2. 문항별 소집단 상호작용 양상 빈도	146
4.3. 소집단 상호작용이 모형구성에 미치는 영향	150
4.3.1. 튜터링	150
4.3.2. 경쟁	166
4.3.3. 협업	172
4.3.4. 양립성 확인	178
5. 결론	183
5.1. 요약	183
5.2. 결론 및 제언	187
참 고 문 헌	188
부 록	200
Abstract	213

표 목차

[표 2-1] Newtonian 모델링 게임의 규칙(Hestenes, 1992).....	15
[표 2-2] 뉴턴 역학을 정의하는 법칙(Hestenes, 1992).....	16
[표 2-3] 등가속도 운동에 대한 뉴턴 역학의 대응 규칙(Halloun, 2004).....	17
[표 2-4] 뉴턴 역학의 기본 모형(Halloun, 2006).....	21
[표 2-5] 본 연구의 계에 관한 일반 규칙	25
[표 2-6] 뉴턴 역학 관련 중학교와 고등학교 과학 성취기준(2011년 고시).....	26
[표 2-7] 뉴턴 역학 관련 물리 I, 물리II 성취기준(2011년 고시)	27
[표 2-8] 중등학교 교육과정에서 다루는 뉴턴 역학의 지식 구조	28
[표 2-9] 초심자와 전문가의 지식 비교(권재술, 이성왕, 1988).....	39
[표 2-10] 역학에서의 모형구성 단계(Hestenes, 1987)	52
[표 2-11] 모형 구성 요소의 세부 항목과 정의(Lopes & Costa, 2007)	54
[표 2-12] 본 연구와 선행 연구의 모형구성 과정 비교	63
[표 2-13] 모형구성 분석틀의 단계	64
[표 2-14] 동료교수의 기본 모듈(장혜원, 2014)	68
[표 2-15] 동료교수에서 비표준 대화(James & Willoughby, 2011)	71
[표 2-16] 담화 유형 분류틀(Hogan et al, 1999)	73
[표 2-17] 소집단 모델발달 유형과 상호작용 특성(이신영 외, 2012)	74
[표 3-1] 문제 상황과 평가 요소	80
[표 3-2] 뉴턴 역학의 지식 구조에 따른 문항 분석	83
[표 3-3] 문항 정답률	86
[표 3-4] 모듈의 정답 분포 변화	88
[표 3-5] 소집단 상호작용 양상 범주화 기준.....	93
[표 4-1] 본 연구 참여자들의 모형구성 유형	108
[표 4-2] 1번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	111
[표 4-3] 2번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	113
[표 4-4] 3번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	115
[표 4-5] 4번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	117
[표 4-6] 5번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	119
[표 4-7] 6번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	120
[표 4-8] 7번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	122
[표 4-9] 8번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	124

[표 4-10] 9번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	126
[표 4-11] 10번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	128
[표 4-12] 11번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	130
[표 4-13] 12번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움	132
[표 4-14] 각 문항별 모형구성의 어려움	132
[표 4-15] 소집단 상호작용의 양상.....	146
[표 4-16] 소집단 상호작용 양상의 빈도(N=118)	148

그림 목차

[그림 1-1] 연구과정의 개요	6
[그림 2-1] 과학적 패러다임의 조직(Halloun, 2006)	15
[그림 2-2] 대상과 동인, 계와 환경(Halloun, 2006)	18
[그림 2-3] 뉴턴 역학의 위계(Van Heuvelen, 1991)	20
[그림 2-4] 역학 분야의 지식 유형(Reif & Heller, 1982)	22
[그림 2-5] 역학의 지식 유형별 하위 범주(Reif & Heller, 1982)	23
[그림 2-6] 본 연구의 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조	24
[그림 2-7] 물리적 의미를 수학으로 사상(Tuminaro & Redish, 2007)	34
[그림 2-8] 수학으로의 음역에 대한 도식(Tuminaro & Redish, 2007)	35
[그림 2-9] GEM 순환 (Clement, 2008)	45
[그림 2-10] 실제 세계의 매개체로써의 모형(Giere, 1990)	47
[그림 2-11] 모형구성 관점에서 해석한 물리 문제해결 과정	48
[그림 2-12] 모형과 물리적 현상의 관계(Hestenes, 1992)	49
[그림 2-13] 모형구성 능력 요소(Lopes & Costa, 2007)	53
[그림 2-14] 모형구성으로써 문제해결(Niss, 2012)	57
[그림 2-15] 모형구성 요소와 학습자의 인지적 과정	58
[그림 2-16] 본 연구의 모형구성의 분석틀	62
[그림 2-17] 모형구성 분석틀의 각 단계와 모형구성 요소와의 관계	65
[그림 2-18] 모형구성 요소의 상호작용	75
[그림 3-1] 수업의 흐름	79
[그림 3-2] 모형구성 요소의 상호작용 예시	95
[그림 4-1] 모형 분면을 타당하게 구성하고 타당한 해를 구한 유형	97
[그림 4-2] 2번 문항에 대한 S4의 모형구성	98
[그림 4-3] 모든 분면을 타당하게 구성했으나 계산 오류를 범한 유형	99
[그림 4-4] 4번 문항에 대한 S4의 모형구성	100
[그림 4-5] 일부 분면의 타당성이 결여된 유형	101
[그림 4-6] 7번 문항에 대한 S8의 모형구성	102
[그림 4-7] 일부 분면만을 구성한 유형	103
[그림 4-8] 8번 문항에 대한 S13의 모형구성	104
[그림 4-9] 부적절한 개념 모형을 선택한 유형	105
[그림 4-10] 11번 문항에 대한 S25의 모형구성	106

[그림 4-11] 비과학적인 직관이나 추측을 통해 해를 선택한 유형	107
[그림 4-12] 1번 문항에 대한 S20의 모형구성	107
[그림 4-13] 전체 문항의 모형구성 유형 분포와 정답률 비교	109
[그림 4-14] 1번 문항의 모형구성 유형 분포	110
[그림 4-15] 2번 문항의 모형구성 유형 분포	112
[그림 4-16] 3번 문항의 모형구성 유형 분포	114
[그림 4-17] 4번 문항의 모형구성 유형 분포	116
[그림 4-18] 5번 문항의 모형구성 유형 분포	118
[그림 4-19] 6번 문항의 모형구성 유형 분포	119
[그림 4-20] 7번 문항의 모형구성 유형 분포	121
[그림 4-21] 8번 문항의 모형구성 유형 분포	123
[그림 4-22] 9번 문항의 모형구성 유형 분포	125
[그림 4-23] 10번 문항의 모형구성 유형 분포	127
[그림 4-24] 11번 문항의 모형구성 유형 분포	129
[그림 4-25] 12번 문항의 모형구성 유형 분포	131
[그림 4-26] 6번 문항 8조의 모형구성 유형 변화(튜터링)	137
[그림 4-27] 3번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(경쟁-합의)	139
[그림 4-28] 9번 문항 4조의 모형구성 유형 변화(경쟁-고수)	140
[그림 4-29] 6번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(협업)	142
[그림 4-30] 1번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(양립성 확인)	144
[그림 4-31] 튜터링에 참여한 교수자와 피교수자(A2)의 모형구성 비교	152
[그림 4-32] 튜터링에 참여한 S15와 S18의 상호작용과 모형구성 변화	152
[그림 4-33] 튜터링에 참여한 S17과 S20, S22의 상호작용과 모형구성 변화 ·	156
[그림 4-34] 튜터링에 참여한 교수자와 피교수자(ID)의 모형구성 비교	161
[그림 4-35] 튜터링에 참여한 S10과 S8의 상호작용과 모형구성 변화	162
[그림 4-36] 튜터링에 참여한 S19와 S11의 상호작용과 모형구성 변화	164
[그림 4-37] 경쟁에 참여한 S17(A4)과 S13, S31(A2)의 모형구성 비교	167
[그림 4-38] 경쟁에 참여한 S17과 S13, S31의 상호작용과 모형구성 변화 ...	168
[그림 4-39] 경쟁에 참여한 S9(A4)와 S28(A2)의 모형구성 비교	170
[그림 4-40] 경쟁에 참여한 S9와 S28의 상호작용	172
[그림 4-41] 협업에 참여한 S1의 모형구성 변화	174
[그림 4-42] 협업에 참여한 S23과 S21의 상호작용과 모형구성 변화	175

[그림 4-43] 협업에 참여한 S29와 S7의 상호작용과 모형구성 변화	177
[그림 4-44] 양립성 확인에 참여한 S21과 S9의 모형구성 비교	179
[그림 4-45] 양립성 확인에 참여한 S21과 S9의 상호작용과 모형구성 변화 ..	180

1. 서론

1.1. 연구의 배경

물리 문제해결은 개념의 이해와 습득(Van Heuvelen, 1991; Hsu *et al.*, 2004), 평가(Hestenes *et al.*, 1992; Hestenes & Wells, 1992), 물리학의 절차적 지식 습득(Larkin & Reif, 1979; 권재술, 이성왕, 1994; Henderson *et al.*, 2004; Hsu, *et al.*, 2004), 일반적인 영역에서의 문제해결 능력 증진 등을 목적으로 물리교육에서 광범위하게 활용되는 교수학습 전략이자 도구이다. 그동안 많은 교사들이 물리 문제를 잘 푸는 것이 물리를 잘하는 것이라는 믿음 하에 학생들에게 다양한 문제해결 경험을 요구해왔다(de Ataíde & Greca, 2013). 그러나 대다수의 학생들은 물리 문제해결을 어려워하며(Kim & Lee, 2006; Lim & Lee, 2013) 물리 문제해결 과정을 통해 의미 있는 추론을 하지 못하고 수학적 계산과정을 익히는데 주력하고 있는 실정이다(Hestenes, 1997; Redish *et al.*, 1998; Halloun, 2006; Mason & Singh, 2010). 이로 인해 물리학의 매력을 느끼는 학생들조차 물리 문제해결의 어려움 때문에 물리학을 기피하고 있는 실정이다(Angell *et al.*, 2004).

한편, 동료교수는 물리 문제해결 과정에서 동료와의 상호작용을 활성화함으로써 학생들의 개념 이해 수준을 향상시키고 수업의 참여도를 높이기 위한 교수 모형이다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001). Mason & Singh, 2010). 동료교수에 관한 선행 연구들은 학생들의 개념 이해, 문제해결 능력, 수업 참여도, 효과적인 문제해결 전략 사용 등에 긍정적인 효과가 있음을 일관성 있게 보고한다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001; Smith *et al.*, 2009; Mason & Singh, 2010). 동료교수는 10년 이상의 광범위한 현장 연구를 통해 동료와의 상호작용이 물리 문제해결의 어려움을 극복하고 물리 학습에서 문제해결의 본래 취지를 되새기

는데 긍정적인 기여를 한 것으로 평가받고 있다. 그러나 학생들의 성취도 평가가 지나치게 정량적이고 개념 검사 위주이며, 학생들의 상호작용이 학습에 미치는 영향에 대한 인지적인 분석이 부족하다는 비판의 목소리도 존재한다(James & Willoughby, 2011; Wood *et al.*, 2014). 또한 일각에서는 동료교수의 긍정적인 효과는 상위 수준 학생으로부터 하위 수준의 학생으로 일방적인 전수(transmission)에 의한 것이라는 의구심을 품고 있다(James & Willoughby, 2011). 이러한 지적은 동료교수에서 학생들의 상호작용에 대한 질적 분석이 부족한데서 비롯된다고 할 수 있다(Enghag *et al.*, 2007).

동료와의 상호작용에 대한 질적 분석이 부족했던 이유를 문제해결에 대한 연구자들의 인식에서 찾을 수 있다. 학습자의 문제해결에 대한 기존의 연구들은 정보 처리 이론에 입각하여 초보자인 학생도 전문가의 해결 과정을 잘 학습하면 문제해결을 잘할 수 있을 것이라는 신념을 바탕으로 초보자와 전문가의 문제해결과정을 비교하는 방식이 많았다(Simon & Newell, 1971; 권재술, 이성왕, 1988, Henderson *et al.*, 2004). 이러한 시도는 학생들이 얼마나 효율적이고 적합하게 문제해결 전략을 수립하느냐로 귀결되어 그동안 많은 연구들이 다양한 방식의 문제해결 전략의 도입과 효능에 대해 이루어졌다(Byun *et al.*, 2010; Van Heuvelen, 1991; Heller *et al.*, 1992). 이러한 접근은 학생들의 인지적 도식을 고려하지 않고 일괄적인 지식의 습득에 중점을 두었으로써(James & Willoughby, 2011) 학생들이 물리 문제를 해결해가는 다양하고 복잡한 인지적 과정에 대한 정보를 세밀하게 제공하지 못했다. 이로 인해 동료와의 협동 혹은 협업도 문제해결전략의 일환으로 간주되어 동료와의 상호작용이 학생들의 학습에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 질적인 측면보다는 정량적인 검사 결과에 초점을 맞춘 연구가 주를 이루게 된 것으로 보인다(Lee & Yoo, 2017).

최근에 대두되는 과학교수학습에서 모형구성은 물리 문제해결을 개념 세계를 활용하여 문제 상황에 대한 설명 체계를 구성하는 과정으로 이해

함으로써 물리 문제해결에 관한 보다 질적인 관점을 제공한다(Hestenes, 1987, 1997; Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007; Brew, 2008). 즉, 물리 문제해결은 학습자가 사전에 학습한 개념과 개념 모형들을 적용하여 문제 상황에 대한 모형을 생성하고 이를 통해 해를 도출하는 모형구성으로 볼 수 있다. 학습자들은 물리 문제에 대한 모형구성을 통해 개념 모형의 모호함을 시정하고 명료화함으로써 개념 모형과 과학 이론을 더욱 폭넓게 이해하게 된다(White & Frederiksen, 1990; Halloun, 2006). 이러한 모형구성의 관점은 물리 문제해결이 단지 수학적 풀이를 통해 답을 찾는 행위 이상의 과학적 방법론으로서의 가치를 강조한다. 또한 정답의 옳고 그름과 같은 피상적인 분류에서 벗어나 문제해결 과정에서 나타나는 학생들의 복잡하고 역동적인 인지 과정을 세밀하게 기술할 수 있는 이론적인 틀을 제공할 것으로 기대된다.

역학은 물리학의 보편적이고 기본적인 도구와 규칙을 제공하고 개념과 법칙들을 수학적으로 조직하여 물체의 운동을 기술한다는 점에서 모형구성 연구들에서 가장 많이 다룬 물리학의 영역이다(Hestenes 1987; 1997, Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007; Clement, 2008; Brew, 2008; Bae & Yoo, 2012; Lee & Yoo, 2017). 따라서 물리 문제해결 과정을 모형구성의 관점에서 분석하기에 적합한 영역이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 고등학생들의 물리 문제해결 과정과 소집단 상호작용을 모형구성의 관점에서 분석하여 동료와의 상호작용이 학생의 모형구성에 미치는 영향을 탐색하고자 한다.

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 동료와의 상호작용이 학생의 모형구성에 미치는 영향을 질적으로 탐색하여 학생의 학습에서 동료교수의 역할과 제한점에 대한 시사점을 제안하는데 있다. 이를 위해 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇이고, 문제해결을 위한 소집단 상호작용은 어떠한 양상으로 진행되며, 소집단 상호작용이 학생들의 모형구성에 미치는 영향은 어떠한지를 분석하였다. 이에 관한 구체적인 연구 문제는 다음과 같다.

1. 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇인가?
2. 동료교수 활동에서 고등학생들의 소집단 상호작용 양상은 어떻게 범주화되는가?
3. 고등학생들의 소집단 상호작용 각 유형이 역학 문제에 관한 모형구성에 미치는 영향은 무엇인가?

1.3 연구과정의 개요

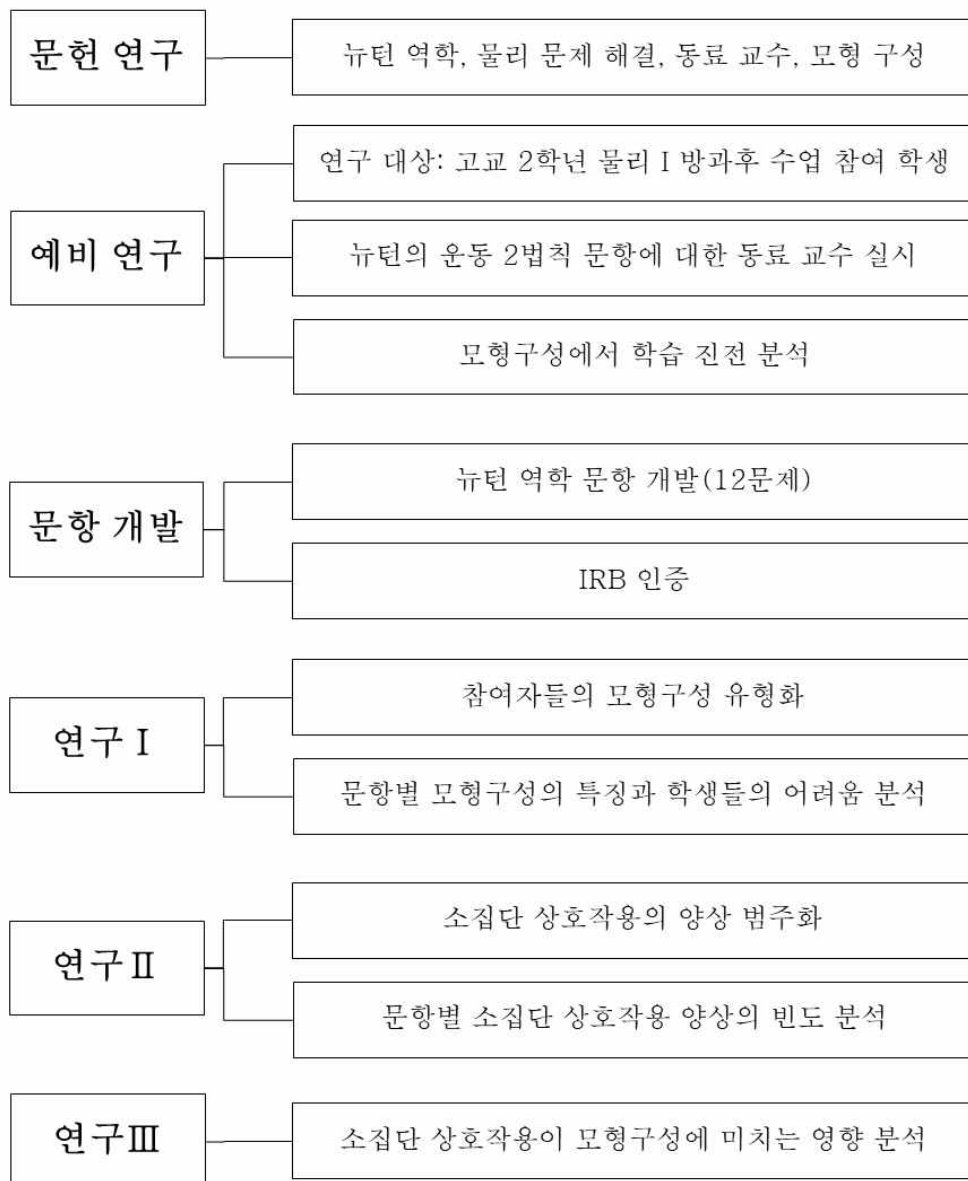
본 연구를 실시하기에 앞서 뉴턴 역학, 물리 문제해결에서 학생들이 겪는 어려움과 특징, 동료교수의 효용성, 물리 문제해결에서 소집단 상호작용의 양상 등에 대한 선행 연구를 조사하였다. 그리고 과학적 모형과 모형구성에 대한 이론적 고찰을 통해 모형구성 관점에서 물리 문제해결 과정을 인지적으로 분석하기 위한 이론적인 틀을 고안하였다. 이를 바탕으로 경기도에 소재한 일반계 고등학교에 개설된 물리 I 방과 후 수업을 수강하는 학생 20명(남 13명, 여 7명)을 대상으로 예비 연구를 진행하였다. 동료교수 활동에서 나누는 학생들의 담화와 작성된 활동지를 분석하여 모형구성에 대한 학습 발달과정(learning progression)을 분석하였다. 예비 연구 결과 동료교수 활동이 정답의 일방적 전달을 넘어 물리적 대상 및 상황에 대한 이론적 설명과 모형 구성에서의 학습 진전(learning advancement)에 기여함을 확인할 수 있었다.

예비 연구에서 사용한 문항을 기초로 고등학교 물리 I 교육과정과 뉴턴 역학의 지식구조를 반영하여 본 연구에서 사용할 12개의 선다형 문항을 제작하였다. 고등학교에서 물리 I 을 수강하는 일반계고 학생들을 대상으로 예비 검사를 실시한 뒤 물리교육 전문가 3인의 검토를 거쳐 문항과 활동지를 수정·보완하였다. 연구 계획에 대한 IRB 인증을 획득한 이후 서울시에 소재한 인문계 고등학교 학생들을 대상으로 연구 참가자를 모집하였다.

연구에 자발적으로 참여 의사를 밝힌 일반계 고등학교 남학생 32명을 대상으로 90분씩 2차시 동안 동료교수를 적용한 수업을 진행하였다. 연구 I 에서는 동료교수 활동 학생들이 작성한 활동지와 담화 자료를 분석하여 학생들의 모형구성을 유형화하였다. 각 문항별 학생들의 모형구성 유형의 분포와 특징을 기술한 뒤 학생들이 모형구성에서 겪는 어려움을 분석하였다.

연구 II에서는 참여자들의 소집단 상호작용 양상을 모둠 내에 대응된 모형을 구성한 모둠원의 수, 모둠원의 역할, 모형의 동질성, 모형의 변화 측면을 기준으로 범주화하였다.

연구 III에서는 소집단 상호작용에서 문제 상황, 개념 세계 및 모형에 대한 상호작용이 참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 사례 분석하였다.



[그림 1-1] 연구과정의 개요

1.4 용어의 정의

1.4.1. 역학(Mechanics)

본 연구에서의 역학은 뉴턴에 의해 집대성된 17세기까지의 뉴턴 역학을 의미하며 세 가지 운동 법칙과 만유인력 법칙으로 대표된다(French, 1971). 역학의 내용 범위는 중학교 과학의 힘과 관련과 내용, 고등학교 물리 I 교육과정에서 다루는 시간과 거리, 속도와 가속도, 세 가지 운동 법칙, 운동량과 충격량 등으로 한정되었다.

1.4.2. 개념 세계(Conceptual world)

본 연구에서는 개념 세계를 개념 모형을 중심으로 과학적 이론, 법칙, 개념 등이 체계적으로 구조화되어 있는 것으로 이해하였다. 개념 모형이란 과학적 이론에서 다루는 전형적인 현상에 대한 외적 표상으로(Nersessian, 1999) 개념들의 관계를 규정지음으로써 이론의 하부 요소를 구성한다(Hestenes, 1997; Greca & Moreira, 2002, Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007; Brewe, 2008). 개념 모형은 공동체의 과학적 지식과 일치하며 수학적 공식이나 비유(analogy), 물질적인 인공물(material artifacts)로써 구체화된다(Greca & Moreira, 2002, Halloun, 2006). 역학의 대표적인 개념 모형으로 등가속도 운동 모형을 들 수 있으며 $v = v_0 + at$, $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ 와 같은 수학적 공식을 통해 속도, 가속도, 변위 등의 관계가 규정된다.

1.4.3. 모형(Model)

모형에 대한 정의는 학자들마다 분분하며 여러 학계에서 다양한 의미로 사용되고 있다. 그러나 모형이 다양한 표상을 통해 현상과 대상을 대리하고 이들의 상태를 기술하고 설명한다는 점은 공통적이다. 따라서 본 연구에서는 모형을 문제 상황을 기술하고 설명하기 위한 설명 체계로 이해하였다. 모형은 세부적으로 물체의 상태 변화를 기술하는 상태 분면, 대상에 작용하는 상호작용 간의 관계를 기술하는 상호작용 분면, 상호작용에 의한 물체의 상태 변화를 인과적으로 설명하는 인과 분면, 문제의 해(answer) 등으로 구성된다.

1.4.4. 모형구성(Modeling)

학습자들의 물리 문제해결 과정은 해를 구하기 위해 개념들을 조직하여 문제 상황에 관한 설명 체계를 구성한다는 점에서 모형구성으로 이해할 수 있다(Hestenes, 1987, 1997; Brewster, 2008; Niss, 2012). 이에 본 연구에서는 물리 문제해결을 학습자가 사전에 가지고 있던 개념 세계를 기반으로 문제 상황에 대한 설명 체계, 즉 모형을 생성해가는 모형구성으로 정의하였다. 물리 문제에 대한 모형구성은 문제 상황, 개념 세계, 모형 등의 세 가지 요소에 관한 다음의 인지적 과정을 통해 구체화된다.

1) 문제 상황 인식(Problem situation recognition)

문제 상황 인식은 학습자가 문제에서 제시한 정보들을 바탕으로 문제 상황의 물체들을 대상(object)과 동인(agent)으로 구분하여 모형의 계를 설정하고 계에 속한 대상의 상태 변화와 상호작용을 관련 개념의 표상인

기술자(descriptor)로 인지하고 이를 식별하는 과정이다.

2) 개념 세계 인출(Conceptual world retrieval)

개념 세계 인출은 계의 상태를 기술하고 설명하기 위해 학습자가 자신의 개념 세계에서 가장 적합한 개념 모형을 선택하는 것을 의미한다. 어떤 개념 모형을 선택하는가에 따라 개념들의 관계가 다르게 규정되므로 개념 모형 선택은 단순한 공식의 상기가 아니라 계의 특성에 부합되도록 개념들의 관계를 설정하는 과정으로 이해할 수 있다(Halloun, 2006; Lopes & Costa 2007).

3) 모형 생성(Model generation)

본 연구에서 모형 생성은 계의 상태와 상호작용 기술자들을 적절한 개념 세계의 요소들과 연관 지어 모형을 생성하는 일련의 과정을 의미한다. 모형은 계의 운동 상태 변화를 기술하는 상태 분면, 계에 작용하는 상호작용 간의 관계를 기술하는 상호작용 분면, 상호작용에 의한 계의 상태 변화를 인과적으로 설명하는 인과 분면 등을 형성함으로써 그 구조가 구체화된다고(Halloun, 2006). 분면이 형성되면 학습자는 초기 조건들을 각 분면에 적용하여 문제 상황에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용, 특성 등과 관련된 해를 수학적 조작을 통해 도출한다. 마지막으로 학습자는 분면 간의 일관성과 같은 내적 요인, 문제의 보기와 해의 일치 여부와 같은 외적 요인을 기준으로 모형의 타당성을 검증한다(Niss, 2012; Lee & Yoo, 2017).

1.4.5. 동료교수(Peer instruction)

동료교수(peer instruction)는 동료와의 소집단 상호작용을 통해 학생들의 수업 참여와 개념 이해 수준을 높이하고자 한 물리 문제해결과 관련된 대표적인 수업 모형이다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001).

본 연구에서는 동료교수는 다음과 같은 절차로 진행된다. 학생들은 먼저 개별적으로 선다형 문제를 풀 뒤에(응답 I) 교실응답시스템(Classroom Response System)에 접속하여 자신이 선택한 보기를 교사에게 전송한다. 교사는 가급적 답이 다른 학생들로 모둠을 편성하여 이를 개별 공지한다. 학생들은 모둠별로 모여 문항에 대한 각자의 풀이와 답에 대해 토론한 후, 원래 자리로 돌아와 개별적으로 교사에게 답을 전송한다(응답 II).

1.4.6. 소집단 상호작용(Small group interaction)

본 연구에서 소집단 상호작용은 문제해결에 관한 동료교수 활동에서 학생들의 담화와 제스처, 활동지의 교환 등의 의사소통 행위를 의미한다.

학생들의 소집단 상호작용은 문제 상황 인식, 개념 세계, 모형 등의 모형구성 요소에 대한 논의로 세분화된다. 용어의 혼동을 막기 위해 담화를 비롯한 학생들의 전체적인 의사소통은 소집단 상호작용으로, 모형구성 요소에 대한 논의는 상호작용으로 구분하여 표현하였다.

1.5. 연구의 한계

본 연구에서는 학생들의 소집단 상호작용이 역학 문제에 대한 모형구성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고 이를 바탕으로 동료와의 상호작용이 물리학습에 더욱 의미 있게 기여하기 위한 시사점을 제공하고자 하였다. 이를 위해 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇이고 이를 해결하기 위한 소집단 상호작용은 어떠한 양상으로 진행되며, 소집단 상호작용이 학생들의 모형구성에 미치는 영향은 어떠한지를 분석하였다. 그러나 본 연구는 다음과 같은 한계를 가지고 있다.

첫째, 뉴턴 역학에 대한 정규 수업이 6개월 지난 시점에서 본 연구의 수업이 실행되었다는 점이다. 따라서 일부 학생들은 뉴턴 역학과 관련된 지식을 상기하는데 어려움을 보였다. 또한 학생들이 정규 수업을 통해 개념 세계를 어떤 방식으로 형성하였으며 이것이 연구 결과에 어떻게 영향을 미쳤는지 확인할 수 없었다.

둘째, 본 연구는 뉴턴 역학의 문제해결에 한정되었다는 점이다. 모형구성이 영역 의존적인 특성이 있음을 고려할 때 물리학의 다른 영역에서 소집단 상호작용은 뉴턴 역학과 상이한 방식으로 모형구성에 영향을 미칠 가능성이 있다. 물론 뉴턴 역학이 물리학의 기본적인 도구와 규칙을 제공한다는 점에서 본 연구의 결과가 물리학의 일반적인 특성을 반영했을 수도 있다. 이를 논의하기 위해서는 동일한 집단을 대상으로 물리학의 다른 영역에서의 모형구성과 소집단 상호작용에 대한 분석이 필요하다.

셋째, 학생들의 정의적 측면이 소집단 상호작용에 미친 영향에 대한 분석이다. 학생들의 인지적 측면과 더불어 성격, 의사소통 능력, 동료와의 관계, 물리 학습에 대한 자존감 등이 연구 결과에 미친 영향을 배제할 수 없다. 본 연구에서는 모형구성의 인지적 측면에 대한 분석에 초점

을 맞추었으므로 정의적 측면에 대해서는 깊게 다루지 않았다. 그러나 정의적 측면은 소집단 상호작용에 영향을 주는 핵심적인 요인이므로 추후 연구를 통해 심도 있게 분석할 필요가 있다.

마지막으로 본 연구의 대상들이 갖는 대표성이다. 연구의 대상들은 서울시에 소재한 일반계 고등학교 재학 중인 남학생 32명으로 모두 본 연구에 자발적으로 참여하였다. 따라서 물리에 대한 학생들의 흥미, 인식, 성취도, 학습 동기가 대체로 긍정적인 학생들이 많았다. 따라서 본 연구의 결과를 일반화하기 위해서는 다양한 지역, 성별, 학교들을 대상으로 한 추후 연구가 필요하다.

2. 선행 연구와 이론적 논의

2.1. 뉴턴 역학

오늘날 우리가 물리학이라고 부르는 거대한 체계는 다양한 영역으로 구성되어 있다. 그 중에서도 역학은 단순히 한 개 영역 이상의 의미를 지닌다. 역학은 '게임의 규칙'을 결정하고 물리학의 주요 도구를 정의함으로써 자연의 가장 보편적인 법칙을 제시한다. 이를 통해 역학은 물리학의 모든 다른 영역에서 적용되는 물리학의 방법을 기술한다. 이것이 바로 역학이 물리 교육과정에서 도입부에 위치하는 이유이다.¹⁾

역학 혹은 고전 역학이라 불리는 물리학의 영역은 대부분의 중등학교와 대학교의 입문 물리학 교재 앞부분에서 다뤄진다. 이는 역학이 갖는 역사적 의미와 더불어 Galili(1995)가 위에서 언급한 바와 같이 물리학의 보편적이고 기초적인 규칙을 제공하게 때문이다. 즉, 물리 이론은 적은 수의 가설을 기반으로 실제 세계의 현상을 근사적으로 나타낼 수 있는 일관된 수학적 구조를 제공하고 발달시키는데 목적(Corben & Stehle, 1960)이 있다는 점에서 역학은 물리학의 역사에서 최초로 정립된 이론인 동시에 전범(典範)인 셈이다.

역학은 .하이젠베르크의 불확정성 원리를 무시할 수 있는 조건 하에서 입자와 입자계의 운동에 관한 이론이다(Corben & Stehle, 1960). 역학은 수학적 구조와 이론의 발달 관점에서는 뉴턴 역학, 라그랑주 역학, 해밀턴 역학으로 분류되며, 대상의 상태나 속성, 운동의 관점에서는 입자 역학, 강체 역학, 천체 역학, 기체 분자 운동론, 탄성론, 유체 역학 등으로

1) Galili, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 17(3), 371-387. 371p에서 인용

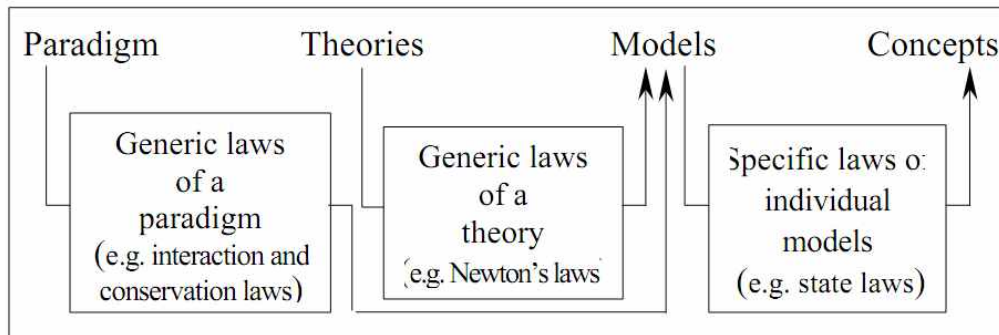
세분화된(Corben & Stehle, 1960).

역학을 대표하는 뉴턴 역학은 내용적으로는 입자 역학과 천체 역학에 걸쳐 있으며, 힘과 가속도 개념의 정립을 통해 현상의 기술에 머물러 있던 물리학을 인과적인 체계로 발전시켰다는 점에서 과학사의 획기적인 업적으로 평가받고 있다(French, 1971). 특히, 뉴턴 역학은 학생들이 물리학자들처럼 방대하고 위계화 된 지식 구조는 아니지만 소박하게나마 나름의 인지 구조를 가지고 있다는 점에서(Nersessian, 1995) 다른 역학의 이론들과 차별성을 갖는다. 따라서 학생들은 뉴턴 역학을 통해 물리학의 기본적인 원리와 공리를 접하고 소박하고 직관적인 패러다임을 물리적인 패러다임으로 전환될 수 있는 기회를 얻는다. 즉, 뉴턴 역학을 통해 학생들은 물리학의 보편적이고 기초적인 규칙을 접하게 되는 것이다. 이러한 관점은 대부분의 물리 교재들이 역학, 그 중에서도 뉴턴 역학을 도입부에 배치하는 당위성을 설명한다.

뉴턴 이전에 뉴턴 역학을 체계적으로 제시한 이는 없었지만 후대의 물리학자들에 의해 뉴턴 역학은 더욱 정교해지고 확장되었다(Hestenes, 1992). 따라서 뉴턴 역학은 대부분의 교과서에서 관행처럼 다루고 있는 뉴턴이 제시한 세 가지 운동 법칙만으로 충분히 이해될 수 없으며 고전 역학의 기본 축을 이루는 과학 이론으로써 체계적으로 살펴볼 필요가 있다.

2.1.1. 뉴턴 역학의 규칙

Halloun(2006)은 과학적 패러다임에서의 개념에 대한 조직도를 [그림 2-1]과 같이 제시하면서 모형을 통해서 이론이 과학적 패러다임의 개념적 내용을 제공한다고 설명하였다. Halloun(2006)은 모든 과학적 이론은 이론에 의해 제공되는 모형 혹은 모형군을 포함하고 있으며 모형을 거쳐야만 개념에 도달할 수 있다고 보았다. 고전 역학을 과학적 패러다임으로 바라보면 뉴턴 역학은 과학적 이론에 해당됨으로 뉴턴 역학을 이루는 모형들을 통해 개념들을 이해할 수 있을 것이다.



[그림 2-1] 과학적 패러다임의 조직(Halloun, 2006)

과학적 이론으로서 뉴턴 역학은 다음과 같은 요소들로 구성된다 (Halloun, 2006).

- (a) 모형 구성과 사용을 위한 특별한 규칙과 이론적 법칙
- (b) 모형 혹은 모형군

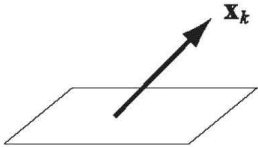

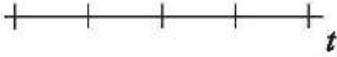
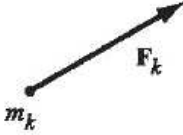
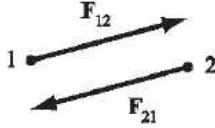
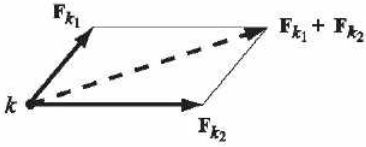
먼저 뉴턴 역학에서의 규칙에 대해서 알아보면, Hestenes(1992)는 뉴턴 역학의 기본 원리를 모형을 구성하는 규칙의 체계로 정의하고 뉴턴 역학의 기본 규칙을 체스에 비유하여 [표 2-1]과 같이 제시하였다.

[표 2-1] Newtonian 모델링 게임의 규칙(Hestenes, 1992)

공간(board)	물리적인 기준계의 3차원 유클리드 공간
말(piece)	점 입자 혹은 입자들로 구성된 모형 개체
목표(object)	물리 세계의 실체와 현상에 대한 타당한 모형을 생성
정당한 움직임 (legal movement)	(1) 입자들에게는 특정한 상호작용에 부합되는 기준계에서 초기 위치 또는 속도가 부여된다. (2) 입자들에게는 일반적인 상호작용 법칙에 부합되는 상호작용이 부여된다. (3) 입자들의 궤적은 일반적인 동역학 법칙이나 그로부터 파생되는 법칙들에 의해 계산되어야 한다. (4) 모형은 그것을 정의하는 법칙의 틀 안에서 물리적 현상과의 일치를 통해 검증된다.

Hestenes(1992)에 따르면 The Newtonian World는 뉴턴 역학에서 모델링 게임이 진행되는 개념의 경기장이다. 여기에는 여러 가지 난이도의 모델링 게임이 존재할 수 있지만 이들은 모두 물리적 현상의 검증된 모델을 생산한다는 공통의 목적을 가지고 있으며 뉴턴의 이론을 정의하는 법칙에서 파생된 동일한 규칙 체계를 공유한다(Hestenes, 1992). 뉴턴 이론을 정의하는 일반적인 법칙은 크게 운동학적(kinematical), 동역학적(dynamics), 상호작용(interaction) 법칙으로 나뉘지며 세부적인 내용은 [표 2-2]에 제시하였다.

[표 2-2] 뉴턴 역학을 정의하는 법칙(Hestenes, 1992)

법칙	설명	도식
운동학적 0 th	모든 입자 k 는 주어진 기준계에서 x_k 로 정의된 위치를 갖는다.	
	입자들의 운동은 궤적 $x_k(t)$ 로 표현된다.	
동역학적	1 st 관성계는 모든 자유 입자들이 등속 운동하는 기준계이다.	
	2 nd 관성기준계에서 힘은 다음과 같이 표현된다. $F_k = m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2}$	
	3 rd $F_{12} = -F_{21}$	
상호작용	4 th $F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$	
	5 th $F_{12} = F(x_1 - x_2, v_1 - v_2)$	

0th 법칙은 뉴턴 역학을 정의하는 법칙 중 가장 기초적인 것으로 길이와 방향, 시간의 측정에 대한 이론적 기반을 제공한다(Hestene, 1992). 1st, 2nd, 3rd 법칙은 뉴턴 역학에서 전통적으로 제시하고 있는 내용이며 4th은 중첩의 원리와 관련된 것이다(Hestene, 1992). 5th 법칙은 뉴턴 역학에서 암묵적으로 다루고 있는 힘의 특성과 관련된 정의를 공식화한 것으로, 두 입자 간의 힘의 함수는 입자들의 상대적인 위치와 속도에 의해 결정됨을 의미한다(Hestenes, 1992).

Hestenes(1992)가 뉴턴 역학의 규칙을 고전적인 법칙에 3가지 법칙을 추가하여 제시한 것과 달리 Halloun(2006)은 일반적인 규칙과 특정 규칙으로 나누어 설명하고자 하였다[표 2-3].

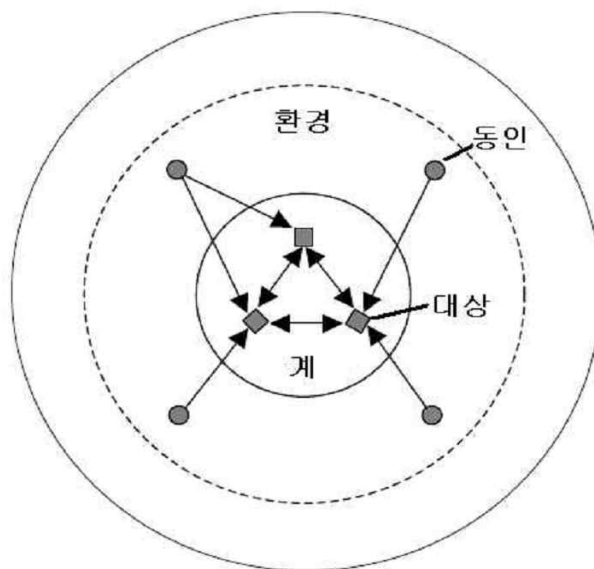
[표 2-3] 등가속도 운동에 대한 뉴턴 역학의 대응 규칙(Halloun, 2002)

규칙	예시
뉴턴 역학 이외의 다른 역학 이론에서도 일반적으로 통용되는 규칙	기준계는 관성기준계이다 계의 고유한 특성(예를 들면 질량이나 차원)은 설정된 정밀함의 한계 안에서 계의 속력에 의해 의미 있게 변하지 않는다. 계의 속력은 광속과 비교할 때 극단적으로 작게 유지된다.
뉴턴 역학 내의 다른 기본 모형에서도 일반적으로 통용되는 규칙	병진 운동하는 계는 특정 기준계에 위치한다. 계의 대상은 서로 상대적으로 운동하지만 대상의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다. 계에 속한 대상은 분해될 수 있지만 전체 계의 질량은 일정하게 유지된다. 병진 운동은 계의 모양이나 차원과 같은 기하학적인 특성에 영향을 받지 않는다.
등가속도 운동 모형에서만 통용되는 규칙	계의 병진 운동은 직선이나 포물선이다. 계에는 외부로부터 일정한 알짜힘이 작용하며 계의 가속도는 일정하다.

Halloun(2006)은 등가속도 운동을 예시로 뉴턴 역학의 대응 규칙

(correspondence rules)을 일반적인 규칙과 특정인 규칙으로 나누어 설명하며, 두 가지 규칙을 모두 준수하지 않는다면 모형은 더 이상 물리적인 계를 표상하지 않는 것이라고 설명하였다. 일반적인 규칙은 역학 분야 전체에서 통용되는 규칙과 뉴턴 역학 안에서만 통용되는 규칙으로 나뉘진다. 역학 분야의 대표적인 일반 규칙은 계의 고유한 특성이 변하지 않는다는 것으로 이를 준수하기 위해 대상들은 형태를 무시한 채 차원이 없는 가상의 질점으로 표현된다(Nersessian, 1995). 특정 규칙은 이론을 구성하는 특정 모형에서만 통용되는 규칙을 의미한다.

Halloun(2006)이 제시한 일반적인 규칙에 덧붙일 수 있는 것은 바로 계(system)의 설정이다. 계는 대상(object)으로 이루어지는데 한 개의 대상으로 이루어진 단순계(simple system)와 서로 상호작용하는 대상으로 이루어진 복합계(composite system)로 구별된다(Halloun, 2006). 계 외부에서 계를 이루는 대상들과 상호작용하는 물리적 실체들을 환경(environment)이라고 하며, 환경을 구성하는 각각의 물리적 실체를 동인(agent)이라 한다[그림 2-2].



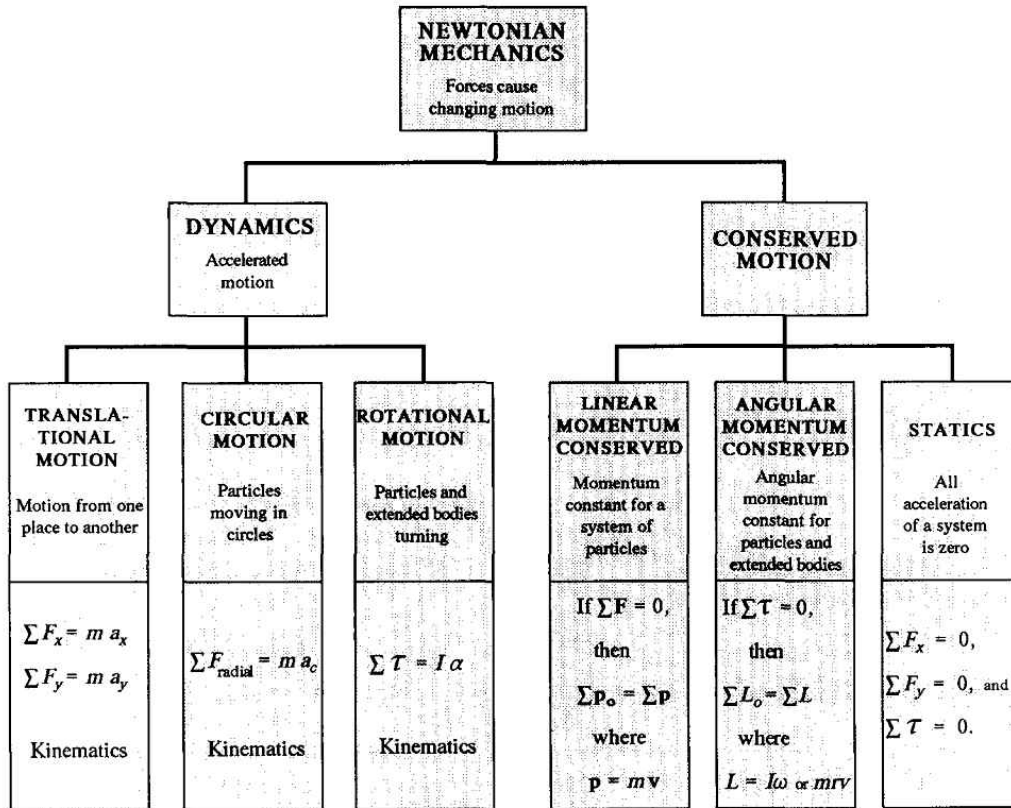
[그림 2-2] 대상과 동인, 계와 환경(Halloun, 2006)

대상과 동인을 구별하는 방법은 상호작용에 의한 상태 변화를 기술하는 차이로, 대상의 상태 변화는 기술하지만 동인의 상태 변화는 기술하지 않는다(Halloun, 2006). 예를 들면, 마찰력이 있는 경사면을 내려가는 수레의 경우 마찰력에 의한 운동 상태의 변화를 기술하지만 반작용에 의한 경사면과 지구의 운동 상태 변화는 기술하지 않는다. 이때의 경사면과 지구가 동인이며 이들을 묶어 환경이라고 할 수 있다.

Halloun(2006)은 계의 상태에 관한 일반적인 규칙을 제시하였으나 물리적인 실체들 중 무엇을 포함시켜 계를 설정하는가에 대해서는 언급하지 않았다. 뉴턴 역학의 다른 규칙이 준수되기 위해서는 적합한 계의 설정이 요구되며, 이와 관련된 핵심적인 규칙은 대상과 동인을 구별하는 것이라 할 수 있다.

2.1.2. 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조

Van Heuvelen(1991)은 [그림 2-3]과 같이 동역학과 보존되는 운동의 대범주로 뉴턴 역학의 지식 위계를 구성하였다. 세부 범주로는 동역학을 병진운동, 원운동, 회전 운동 등으로, 보존되는 운동을 운동량 보존, 각운동량 보존, 정역학 등으로 구분하였다(Van Heuvelen, 1991). Van Heuvelen(1991)의 이러한 시도는 문제해결의 측면에서 뉴턴 역학의 전반적인 내용을 포괄하는 위계를 설정했다는 점에서 의미를 부여할 수 있다. 그러나 대상의 물리적인 특성을 고려하지 않고 운동 상태만을 기준으로 적용했다는 점에서 분류 기준이 다소 피상적이며, 강체의 회전과 같이 일반 물리학에서 다루는 내용도 포함하고 있어 무차원의 입자를 다루는 중등 수준의 뉴턴 역학에는 적합하지 않다.



[그림 2-3] 뉴턴 역학의 위계(Van Heuvelen, 1991)

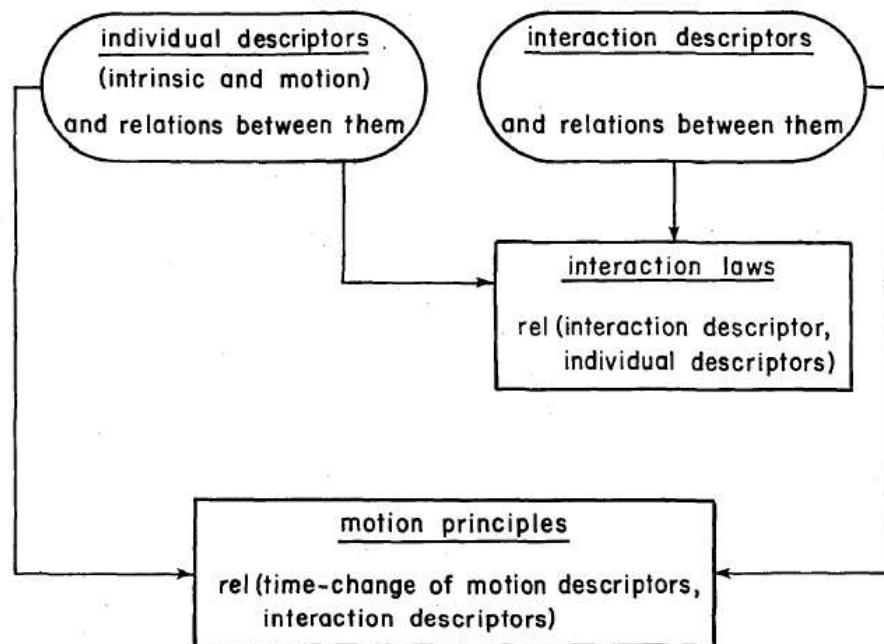
Halloun(2006)은 과학적 이론 안에 있는 여러 모형들은 모형의 범위와 개념의 복잡성에 따라서 신흥(emergent) 모형, 기본(basic) 모형, 부차(subsidiary) 모형으로 구분할 수 있다고 하였다. 신흥 모형은 기본 모형의 결합에 의해서 만들어지며, 부차 모형은 일상생활의 예가 해당된다. Halloun(2006)은 [표 2-4]와 같이 뉴턴 역학의 기본 모형을 자유 입자, 일정하게 가속되는 입자, 조화 진동자에 속박된 입자 및 일정한 원운동에 속박된 입자로 제시하였다.

[표 2-4] 뉴턴 역학의 기본 모형(Halloun, 2006)

기본 모형	설명
자유 입자	관성 기준계에서 합력이 0인 상태로 일정한 속도를 유지하는 물체
일정하게 가속되는 입자	일정한 합력 하에서 일정한 가속도로 직선이나 포물선 운동을 하는 물체
조화 진동자에 속박된 입자	힘의 중심으로부터 변위에 비례하는 합력 하에서 앞뒤로 주기운동을 하는 물체
일정한 원운동에 속박된 입자	일정한 크기의 구심력 하에서 일정한 원운동을 하는 물체
충격 상호작용의 입자	충돌의 경우처럼 아주 짧은 주기 동안 작용한 힘에 의해서 선운동량이 변한 물체

Hestenes(1992)와 Halloun(2006)이 패러다임의 관점에서 뉴턴 역학의 규칙과 위계를 제시하였다면 Reif & Heller(1982)는 영역(domain)의 특정한 실체(entities)들을 기술하는 특성 개념을 기술자(descriptor)라고 정의하고 기술자를 중심으로 뉴턴 역학의 문제해결을 위한 지식 기반(knowledge base)을 분석하였다. 특정 영역의 지식 기반(knowledge base)은 기술자들과 기술자간에 존재하는 관계, 그러한 관계를 변형하는 과정을 통해 구체화된다고(Reif & Heller, 1982). Reif & Heller(1982)에 따르면 역학의 지식 기반을 형성하는 기술자들은 [그림 2-3]과 같이 세분화된다. 기술자들은 개별적 기술자(individual descriptor)와 상호작용 기술자(interaction descriptor)로 나뉘지는데, 개별적 기술자는 입자들 간에 상호작용을 고려하지 않고 입자 하나의 특성을 의미하는 것으로 질량이나 속도를 그 예로 들 수 있다. 상호작용 기술자는 계 혹은 입자들이 어떻게 상호작용 하는지를 기술하기 위해 사용되며 힘과 돌림힘이 그 예이다. Reif & Heller(1982)는 기술자 개념을 이용하여 [그림 2-4]와 같이 역학 분야의 4가지 유형의 지식을 제안하였다.

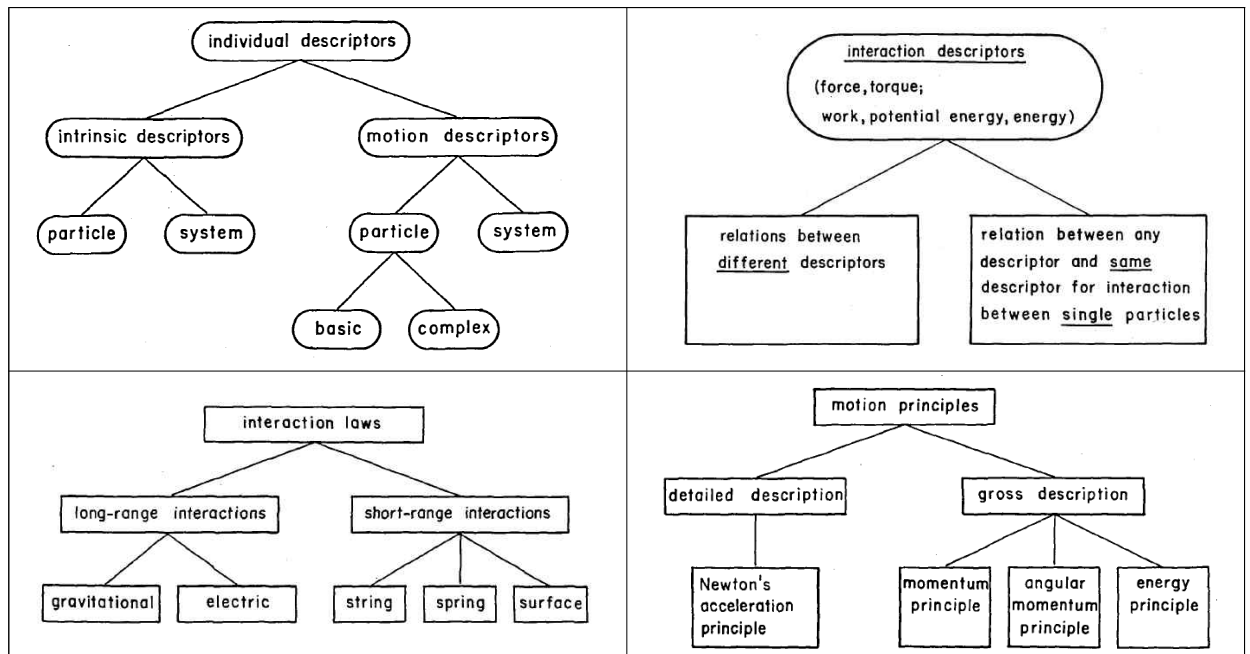
첫 번째 유형은 개별적 기술자 혹은 개별적 기술자들의 관계에 대한 것으로 질량과 같은 고유(intrinsic) 기술자와 위치, 속도와 같은 운동(motion) 기술자로 세분화된다. 두 번째 유형은 상호작용 기술자 혹은 상호작용 기술자의 관계에 대한 것이다. 세 번째 유형은 계와 입자들이 어떻게 상호작용하는가를 구체화하는 것으로 개별적 기술자와 상호작용 기술자의 관계를 기술한다. 네 번째 유형은 입장의 운동을 기술하기 위한 것으로 다른 계와의 상호작용에 의해 계의 상태 기술자가 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 구체화한다. 4가지 유형의 하위 범주를 [그림 2-5]에 표시하였다.



[그림 2-4] 역학 분야의 지식 유형(Reif & Heller, 1982)

Reif & Heller(1982)의 지식 유형은 기술자를 중심으로 역학 문제해결에 관한 지식 위계를 제안했다는 점에서 다른 선행 연구들과의 차이를 보인다. 또한 뉴턴 역학에서 자주 언급되는 중력과 탄성력, 표면에서 작용하는 힘들을 체계적으로 분류한 점 역시 뉴턴 역학을 학습하는 학생들의 입장에서 실질적으로 도움이 될 수 있는 부분이다. 그러나 뉴턴 역학

의 인과적인 구조를 운동 원리로 명명한 것은 표현과 의미 간의 괴리가 존재하기에 적절하지 않다고 판단된다. 또한 상호작용 기술자와 상호작용 법칙 간의 위계적인 요소를 고려한다면 4개보다는 3개의 지식 유형으로 나누는 것이 더 적절해 보인다.

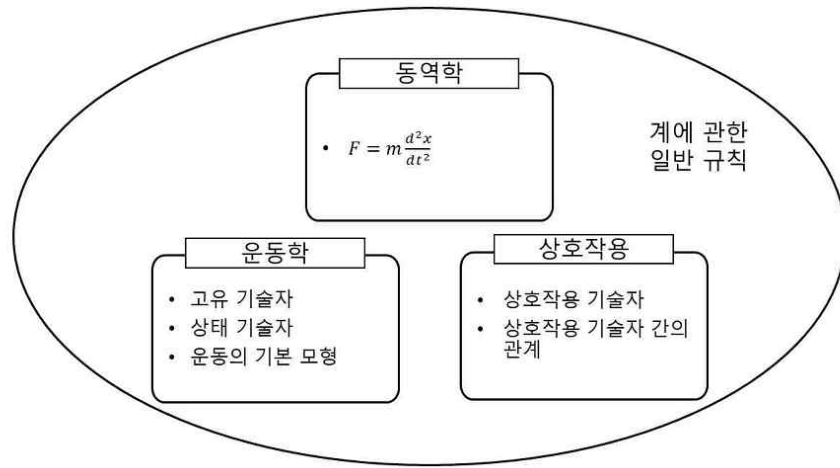


[그림 2-5] 역학의 지식 유형별 하위 범주(Reif & Heller, 1982)

본 연구에서는 앞에서의 논의를 종합하여 계에 관한 일반적인 규칙과 세 가지 범주의 지식으로 구성된 뉴턴 역학의 문제해결에 관한 지식 구조를 [그림 2-6]과 같이 정의하였다. 뉴턴 역학의 문제해결에 관한 지식 구조는 계에 관한 일반 규칙과 세부 지식으로 나뉘지며 세부 지식은 다시 동역학, 운동학, 상호작용으로 범주화된다.

먼저 뉴턴 역학에서 일반 규칙은 바로 계(system)와 관련된 것이다. 물리 이론을 적용하여 실체(reality)들의 상태와 운동을 설명하는 것은 실체들에 관한 계의 구성에서부터 시작된다(JI *et. al.*, 2017). 계에 관한 일반 규칙은 계의 구성과 특성, 운동의 기본 원리를 규정지음으로써 뉴턴 역학의 이론 체계 안에서 현상에 대한 설명이 타당성을 가지게 한다. 본 연구에서는 Halloun(2006)이 제시한 뉴턴 역학의 일반적인 규칙

(general rules)을 계에 초점을 맞추어 [표 2-5]와 같이 수정하였다.



[그림 2-6] 본 연구의 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조

운동학(Kinematics)은 운동 상태를 기술하는 것으로 질량과 같은 대상의 고유 기술자와 위치, 속도와 같은 상태 기술자, 운동의 기본 모형으로 세분화된다. 상태 기술자들의 관계는 운동의 기본 모형에 의해 구체화되며(Reif & Heller, 1982) 입자 운동에 관한 기본 모형은 등속직선 운동, 등가속도 운동, 원운동, 조화 진동자, 충격에 의한 운동으로 세분화된다(Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 상호작용(interaction)은 대상과 대상 혹은 대상과 동인 간의 상호작용을 의미하며 상호작용 기술자와 상호작용 기술자 간의 관계에 의해 구체화된다(Reif & Heller, 1982). 상호작용 기술자는 대상-대상 간의 상호작용과 대상-동인 간의 상호작용으로 구분된다(Halloun, 2006). 상호작용 기술자 간의 관계는 힘의 합성과 작용 반작용에 관한 것이다(Halloun, 2006). 마지막으로 동역학(Dynamics)은 상호작용에 의해 계의 운동 상태가 변화하는 인과 관계를 설명하는 것으로 운동 2법칙으로 표현된다.

[표 2-5] 본 연구의 계에 관한 일반 규칙

계의 구성	계는 하나 혹은 둘 이상의 대상으로 구성되며 대상은 차원이 없는 질점으로 간주된다.
계의 특성	계의 고유 특성은 계의 운동 상태에 의해 변하지 않는다.
계의 운동	<p>계의 운동을 기술하는 기준계는 관성기준계이다.</p> <p>계의 병진 운동은 계의 기하학적인 특성에 영향을 받지 않는다.</p> <p>계의 속력은 광속과 비교하여 극단적으로 작다.</p> <p>대상들의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다.</p> <p>대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다.</p>

2.1.3. 중등 교육과정의 뉴턴 역학

본 절에서는 뉴턴 역학과 관련된 중등 교육과정의 내용을 정리하였다. 먼저 중학교 과학과 고등학교 과학, 물리 I, II의 교육과정에서 뉴턴 역학과 관련된 내용을 [표 2-6]과 [표 2-7]에 정리하였다.

중학교와 고등학교에서 다루고 있는 뉴턴 역학에 대한 개괄적인 내용을 살펴보면 전반부에서 주로 상호작용과 관련된 내용을, 후반부에서는 그래프를 이용하여 등속직선 운동과 등가속도 운동을 다루고 있음을 알 수 있다. 그러나 가속도라는 개념을 명시적으로 다루지 않는 것으로 보아 뉴턴 역학의 인과적인 설명에 대해서는 깊게 다루지 않으려는 의도를 엿볼 수 있다. 고등학교 과학에서는 뉴턴 역학이 중단원 수준에서 다루지지 않고 행성의 운동과 관련해서 케플러 법칙과 뉴턴의 운동 법칙 간의 관계를 기술하는 정도에서 그치고 있다.

[표 2-6] 뉴턴 역학 관련 중학교와 고등학교 과학 성취기준(2011년 고시)(2011년 고시)

중학교 과학	고등학교 과학
<ul style="list-style-type: none"> ● 힘은 두 물체 사이의 상호작용임을 이해하고, 접촉에 의한 상호작용뿐 아니라 멀리 떨어져 있는 물체 사이의 상호작용이 있음을 안다. ● 중력, 탄성력, 마찰력, 전기력, 자기력 등 여러 가지 힘의 특징을 알고 이들이 주변의 현상을 이해하는 데 어떻게 활용되는지 이해한다. ● 한 물체에 작용하는 두 힘의 합력을 구할 수 있고 알짜 힘을 안다. ● 거리-시간, 속력-시간 그래프를 해석하여 물체의 운동을 설명할 수 있다. ● 물체의 운동을 관찰하여 힘의 작용에 대하여 알고, 이를 통하여 힘과 운동의 관계를 안다. 	<ul style="list-style-type: none"> ● 행성의 운동에 관한 케플러의 법칙을 알고, 뉴턴의 운동 법칙을 이용하여 케플러 법칙을 설명할 수 있다.

2009 개정 교육과정의 물리 I 은 기존 교육과정과 달리 시간, 거리, 위치 등의 유클리드 공간을 정의하는 물리량을 가장 먼저 다룬다. 그리고 속도, 가속도 개념을 도입하여 등속직선 운동과 등가속도 운동 모형에 대한 정량적인 이해를 추구하는 동시에 뉴턴의 운동 법칙을 통한 일차원 운동에 대한 인과적인 설명을 다룬다. 이를 이어 충격량과 운동량 개념으로 짧은 시간 동안 가속도가 변하는 운동을 기술하는 개념 모형을 제시하고 스포츠와 안전 분야에 이를 적용한다. 그러나 물리 I 에는 상호작용에 대해서 명시적으로 다루고 있는 내용이 운동 3법칙 이외에는 없으며 이는 중학교 과학과의 중복을 피하기 위한 것으로 해석된다.

[표 2-7] 뉴턴 역학 관련 물리 I, 물리 II 성취 기준(2011년 고시)

물리 I	물리 II
<ul style="list-style-type: none"> ● 시간을 측정하는 다양한 방법을 알고, 시간 표준의 의미와 확립과정을 이해한다. ● 거리와 위치 측정에 대한 다양한 방법을 알고, 길이 표준의 의미와 확립과정을 이해한다. ● 속도, 가속도의 개념을 이해하고, 이를 바탕으로 1차원 등가속도 운동을 이해한다. ● 뉴턴의 운동법칙을 1차원 운동에 적용하고, 스포츠 등에서 충격량과 운동량 변화의 관계를 이해한다. ● 행성의 운동에 대한 케플러 법칙이 뉴턴의 중력 법칙을 만족하는 것을 이해한다. 	<ul style="list-style-type: none"> ● 위치, 속도, 가속도를 벡터로 표현할 수 있다. ● 물체에 작용하는 힘이 주어졌을 때 운동변화를 정량적으로 이해한다. ● 지표면 근처에서 일어나는 포물선 운동과 원운동을 분석할 수 있다. ● 2차원에서 운동량 보존 개념을 이용하여 충돌 현상을 설명할 수 있다. ● 가속좌표계 안에서 관성력을 도입하여, 가속좌표계 안에서의 물체의 운동을 설명할 수 있다. ● 단진동의 의미와 진자의 주기에 영향을 주는 변인을 이해한다.

물리 II에서는 2차원 운동에 대한 정량적인 이해를 목표로 상태 기술자들을 벡터로써 표현한다. 그리고 뉴턴의 운동 법칙을 학생들이 이해하고 있다는 암묵적 전제 하에 포물선 운동과 원운동의 기본 모형을 정량적으로 표현한다. 물리 II에서는 물리 I 과 달리 운동량 보존을 명시적으로 도입하여 2차원 충돌에서 충돌 전후 물체의 운동을 정량적으로 제시한다. 가속좌표계의 의미와 관성력을 이용하여 가속좌표계를 관성좌표계로 전환하여 운동을 기술하는 방법을 다룬다. 마지막으로 단진자 운동의 정량적인 표현과 물리적인 의미, 주기에 영향을 주는 요인을 제시하였다.

힘과 운동이 중단원 이상의 수준에서 다뤄지고 있는 중학교 과학과 물리 I, II에서 뉴턴 역학의 입자 모형과 관련된 내용을 앞 절에서 제시한 물리 문제해결에 관한 뉴턴 역학의 지식 구조에 따라 [표 2-8]과 같이 분류하였다.

[표 2-8] 중등학교 교육과정에서 다루는 뉴턴 역학의 지식 구조

		중학교 과학	물리 I	물리 II
일반적인 규칙		x	관성기준계, 가속기준계 (상대성이론에서 다름)	가속기준계
운동학	상태 기술자	속도	변위, 속도, 가속도, 운동량	변위, 속도, 가속도, 운동량 (벡터)
	상태기술자 간의 관계	등속직선 운동 등가속도 운동 (정성적)	등속직선 운동 등가속도 운동 충격에 의한 운동 원운동	포물선 운동 원운동 조화 진동자 2차원 충돌
	상호작용 기술자	중력, 탄성력, 마찰력	중력, 충격력, 구심력	중력, 구심력, 관성력, 탄성력, 장력
상호작용	상호작용 기술자 간의 관계	힘의 합성	작용 반작용	x
동역학		x	$F=ma$ $F\Delta t = \Delta p$	$F=ma$

계에 관한 일반 규칙은 물리 I에서 처음으로 언급된다. 그러나 기준계에 대한 내용이 역학에서 다루이지 않고 다음 대단원의 상대성 이론에 등장함으로써 실질적으로 뉴턴 역학의 이해에는 도움이 되지 못하고 있다. 물리 II에서는 관성력을 도입하여 가속기준계를 관성기준계로 전환하여 물체의 운동을 설명할 수 있음을 제시하지만 기준계의 정의와 특성에 대해서는 구체적으로 설명하지 않고 있다.

뉴턴 역학의 일반적인 규칙을 언제 가르쳐야 하는가에 대해서는 논란이 있을 수 있으나(Hestenes, 1992) 물리 II에서조차 제대로 언급되지 않는 점은 고전 역학 패러다임의 이해와 전환이라는 측면에서 비판의 소지가 있다. 또한 물리 I의 경우 뉴턴 역학의 일반적인 규칙에 대한 이해가 부재한 상태에서 상대성 이론의 일반적인 규칙과 인식론을 다루는 것이 적절한지에 관한 비판의 목소리가 있다(Hestenes, 1987; Jho, 2014).

운동학은 급간이 올라감에 따라 등속직선 운동, 등가속도 운동, 원운동, 충격에 의한 운동, 조화 진동자 순으로 시간에 따른 상태 기술자와 차원이 복잡해지는 상황을 다루고 있다. 또한 중학교에서는 언어적인 표상을 위주로 하며 제한된 경우에만 그래프로 개념 모형을 제시했지만 물리 I, 물리 II에서는 그래프와 수식을 중심으로 개념 모형을 표상하고 있다.

중학교에서는 상호작용에 많은 내용을 할애하고 있는데 이는 중학교에서 운동의 인과적인 설명을 시도하지 않는다는 점에서 다소 의아하다. 특히 힘의 합성을 통해 알짜힘을 구하는 것은 뉴턴의 운동 2법칙을 통해 그 물리적인 의미가 실체화 된다는 점에서 중학교보다는 물리 I에서 다루는 것이 적절하다고 판단된다. 또한 물리 I에서는 상호작용 기술자에 대한 언급이 거의 없으나 교과서나 대학수학능력시험에서 다양한 상호작용 기술자를 다루고 있어 현실과 교육과정 사이에 괴리가 크다. 이로 인해 학생들이 물리 I의 문제를 해결할 때 상호작용에 대한 기초 지식이 없어 어려움을 겪고 있는 것으로 나타났다(Lim & Lee, 2015).

동역학에 대한 언급은 중학교에서 명시적으로 나타나지 않았으며 물리 I에서는 뉴턴의 운동 2법칙과 충격량-운동량 관계로 다루진다. 다만 뉴턴의 운동 2법칙과 충격량-운동량 관계가 물리적으로 동일한 인과 구조임에도 불구하고 마치 별개의 법칙처럼 다루고 있어 학생들이 이 둘을 별개의 의미로 해석할 소지가 있다.

2.2. 물리 문제해결

일반적으로 문제해결은 ‘문제’의 내용과 성격에 따라서 영역 특이적 문제해결(Domain-specific Problem Solving)과 일반적 문제해결(General Problem Solving)로 분류된다(박학규, 권재술, 1991). 특정분야 문제해결은 수학이나 물리학, 언어학 등의 분야와 관련된 문제해결로써 교과 교육의 핵심적인 활동이자 중요한 연구 분야이다(박학규, 권재술, 1991). 물리교육에서 물리 문제해결은 문제해결에 관한 학생들의 인지적 과정을 이해하고 물리 문제해결에 대한 학생들의 어려움을 해소시킴으로써 물리에 대한 긍정적인 인식을 심어주기 위해 물리 교육 분야에서 꾸준히 다뤄진 주제이다(Van Heuvelen, 1991; 박학규, 권재술, 1991; Hsu, *et al.*, 2004, Byun & Lee, 2013; Lim & Lee, 2015; Mason & Singh; 2016; Balta, 2016). 이 절에서는 물리 문제해결이 물리 학습에서 갖는 의의와 학생들의 어려움에 관한 논의를 하고자 한다.

2.2.1. 물리 문제해결의 의의

중등학교와 대학교에서 물리를 가르치는 교수자들은 물리 학습에서 문제해결 활동은 다방면의 이득이 있다고 믿고 있다. 가장 광범위하게 알려진 물리 문제해결의 효용성은 바로 물리 개념의 이해이다(Stanic & Kilpatrick, 1988; Van Heuvelen, 1991; Hsu, *et al.*, 2004). 문제는 학습 주제에 대한 이해를 높일 수 있는 도구로써 문제를 푸는 것은 새로운 개념이나 절차를 습득하는 수단(vehicle)으로 간주된다(Stanic & Kilpatrick, 1988). 학생들은 물리 문제를 푸는 과정 중에 개념이 형성되고 개념을 적용하는 방법을 터득할 수 있다(Van Heuvelen, 1991; Hsu, *et al.*, 2004; McDaniel, 2016). Osborne(1990)은 특히, 개념과 같은 물리적인 요소에 관한 물리 문제해결에서는 위 가정의 믿음이 다른 분야에

비해 더욱 뿌리 깊음을 지적하였다.

물리 문제해결은 물리 개념의 이해를 지원하는 동시에 평가를 수행하는 도구이기도 하다(Maloney, 1994). 문제를 해결하는 것은 교육과정에서 제시하고 있는 학습 목표는 아니지만 특정 유형의 문제를 성공적으로 해결하는 것은 특정 개념을 이해했다는 근거로 이해된다(Hestenes *et al.*, 1992; Hestenes & Wells, 1992). 이러한 관점에서 FCI(Force Concept Inventory; Hestenes *et al.*, 1992), MBT(Mechanic Baseline Test; Hestenes & Wells, 1992), TUGK(Test of Understanding Graphs-Kinematics; Beichner, 1994) 등의 다양한 개념 검사 도구가 선다형 문항 형태로 제작되었다. 대부분의 학교 현장에서는 물리 문제해결과 개념 이해의 관계에 대한 암묵적 동의하에 물리 문제를 통해 학생들의 성취도를 평가하고 있다. 그러나 일부 연구에서 물리 문제해결과 물리 개념의 이해 간에 직접적인 연관성이 약하다고 보고하고 있어(Sawrey, 1990; Kim & Pak, 2002; 변태진, 2012; McDaniel, 2016) 물리 문제해결 결과가 반드시 개념의 이해를 담보하지 않는다는 것을 알 수 있다.

물리 문제해결은 개념과 같은 명제적 지식뿐만이 아니라 물리학의 절차적 지식과 밀접하게 연관되었다는 입장도 존재한다(Hestenes 1987; Halloun & Hestenes, 1987; Brewe, 2008). Hestenes(1987)는 물리 지식을 사실적 지식(factual knowledge)과 절차적 지식(procedural knowledge)으로 양분하고 절차적 지식이 모형 구성과 밀접하게 연관되어 있다고 주장한다. 특히 Brewe(2008)는 엄선된 문제들을 통해 과학적 지식의 절차적인 측면을 효과적으로 배울 수 있다고 주장하였다. 그러나 대부분의 연구들은 문제해결을 지원하기 위한 과정적 지식의 정의와 체계화에 집중하여 전문가와 초심자를 비교하는 방식으로 진행되었고(Larkin & Reif, 1979; 권재술, 이성왕, 1994; Henderson *et al.*, 2004; Hsu, *et al.*, 2004), 문제해결을 통해 과학의 어떤 과정적 지식을 익힐 수 있는가에 대한 실증적인 논의가 많지 않다.

마지막으로 물리 문제를 해결함으로써 일반적인 영역에서의 문제해결에 도움이 된다는 입장이다. 물리 문제해결 연구의 궁극적인 목적이 보다 효과적이고 일반적인 문제해결 방법을 찾아 이를 학생들에게 가르침으로써 학생들의 문제해결 능력을 향상시킬 수 있다는 관점이다(박윤배, 권재술, 1991). 그럼에도 물리 문제해결의 경험이 명시적으로 일반적인 영역의 문제해결 능력 향상에 도움이 되었다는 실증적인 연구 결과를 찾아보기 어렵다. 제한적으로 과학적 지식을 일상생활에 적용한 연구 결과를 보면, Clement(1982)는 학생들이 제한된 상황에서만 자신이 배운 과학적 개념을 이용할 수 있으며, 공식 위주의 지식(formula-centered knowledge)을 갖춘 학생의 경우 일상적 상황에서 문제 해결능력이 떨어진다고 보고하였다. 노금자, 김효남(1996)은 초등학생들은 과학적 상황에서는 학교에서 배운 지식을 활용하지만, 일상적 상황에서는 감각적 경험에 의존한다고 주장하였다. 따라서 물리적 지식과 물리 문제해결 능력이 일상생활을 비롯한 다양한 영역에서의 문제해결을 하는데 도움이 되는가에 관해서는 아직까지 실증적인 연구 결과가 부족하다고 할 수 있다. 다만 물리 전공자가 직업 영역에서 동료들로부터 문제해결능력이 뛰어나다는 평가를 받고 있으며, 이를 물리 학습과 물리학의 다양한 문제를 해결하는 과정에서 습득된 능력으로 해석하는 연구 결과도 존재한다(Jin & Yoo, 2014). 종합해보면, 물리 문제해결 경험이 일반적인 영역에서의 문제해결능력 향상에 기여한다는 실증적인 근거는 부족하나 장기간에 걸쳐 물리학을 학습한 사람들은 문제해결 능력 측면에서 우수한 평가를 받고 있음을 잠정적으로 확인할 수 있다.

2.2.2. 물리 문제해결 과정에서 학생들이 겪는 어려움

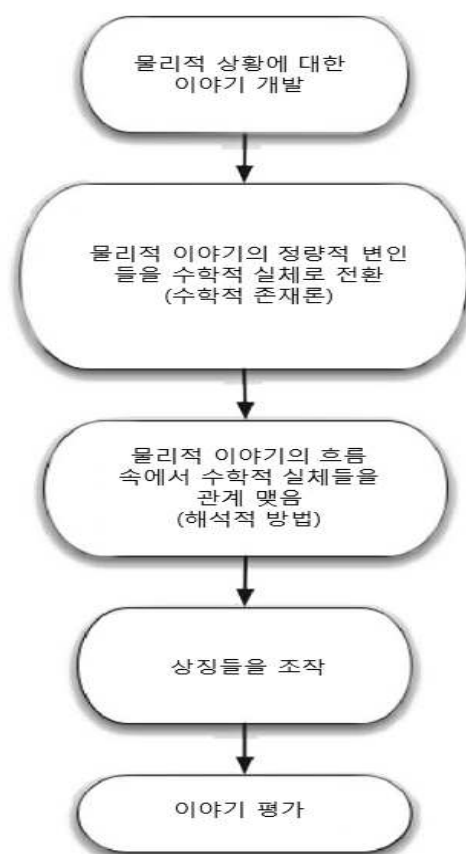
물리 문제해결에 관한 교수-학습에서의 어려움은 크게 인식론적인 측면과 수학적 지식, 표상, 명제적 지식과 같은 내용적인 측면으로 나눌 수 있다. 학습에 있어 인식론적 이해는 인지적 과정에 중대한 영향을 미치

는 요인이며(Hofer, 2001) 약한 인식론적 이해는 학생들의 수행, 일반적 탐구, 물리 개념 학습을 제한한다(Hammer, 1994). 다수의 선행 연구에서 고등학생과 대학생들이 물리 문제해결 과정을 연관된 개념과 이론들로 물리적 상황을 해석하고 설명하는 활동보다는 수학적 계산과정으로 받아들이고 있음을 지적하였다(Larkin & Reif, 1979; Redish *et al.*, 1998; Halloun, 2006; Sherin, 2006; Mason & Singh, 2010; de Ataíde & Greca, 2013). Halloun(2006)은 이를 문제 상황과 관련된 이론과 개념이 어떻게 실제 세계의 대상을 표상하고 있는지 명시적으로 다루지 않았기 때문이라고 주장한다. 예를 들면 학생들은 뉴턴 역학에 관한 문제들은 이론적인 세상에서 존재하며 실제 세상에 대한 구현 가능성(viability)이 없는 것으로 인식함으로써 물리적인 해석이나 설명에 무지하게 된다는 것이다(Halloun, 2006). 교사들과 물리학자들 역시 수학을 특정 문제를 해결하기 위한 도구로 여기고 있으며, 이러한 인식이 학생들에게 전달되어 수학적 표현에 대한 지식과 방정식을 푸는 방법을 익히는 것이 물리학을 잘한다는 인상을 심어주고 있다(de Ataíde & Greca, 2013).

이러한 물리학에 대한 편향된 인식은 물리교과와 수학교과의 연계성 때문으로 해석하는 시각이 많다. 수학은 단순한 도구가 아닌 물리학의 언어이며(Redish, 2006), 계산틀을 제공하고, 물리적인 생각을 반영하고, 규칙을 부호화하는 역할을 한다(Bing & Redish, 2009). 학습자는 수학적 구조가 어떻게 이용되는지, 수학적 구조가 물리적 특성과 어떻게 연관되는지, 실제 물리적 상황을 표상하기 위한 수학적 구조의 정당성을 어떻게 검증하는지 알아야 한다(Karam, 2014).

그럼에도 많은 학생들이 수학과 물리의 관계에 대한 적절한 인식을 바탕으로 물리 문제해결을 수행하지 못하고 있다(Redish, 2006; Tuminaro & Redish, 2007; Jung & Lee, 2009; Niss, 2017). 대표적으로 Tuminaro & Redish(2007)는 대학생들이 물리 문제를 풀기 위해 수학을 사용할 때 6가지의 인식론적 게임을 하고 있는 것으로 확인하였다. 6가지의 인식론적 게임은 물리적인 의미를 수학으로 사상, 수학을 물리적인 의미로 사

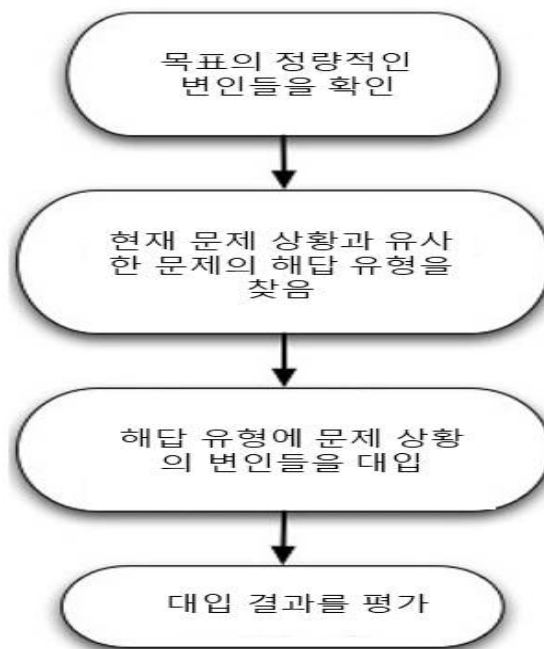
상, 물리적인 메커니즘 게임, 그림 분석, 반복적인 기계적 접근, 수학으로의 음역(transliteration)이다. 이 중 가장 복잡한 인식론적 게임은 물리적인 의미를 수학으로 사상(mapping)하는 것으로 학생들이 먼저 물리적인 상황에 대한 이야기(story)를 개발한 다음 물리학 이야기의 정량적인 값들을 수학적 실체로 변환하게 된다. 그리고 이야기의 흐름에 따라 수학적 실체들을 관계 맺고 조작한 결과를 스토리에 비추어 평가하게 된다 (Tuminaro & Redish, 2007).[그림 2-7]



[그림 2-7] 물리적 의미를 수학으로 사
상에 대한 도식(Tuminaro & Redish,
2007)

반면에 수학으로의 음역(Transliteration To Mathematics)은 물리적인

인식이나 이해가 뒷받침되지 않는다는 측면에서 물리적 의미를 수학으로 사상하는 것과 가장 대조적인 인식론적 게임이다(Tuminaro & Redish, 2007). 즉, 문제에 대한 개념적 이해 없이 다른 문제의 해답 패턴에 변인 값을 대입하는 것으로 방정식의 구문 구조와 관련된 도식만이 활성화 된다(Tuminaro & Redish, 2007; Bing & Redish, 2009)[그림 2-8]. 이러한 인식론적 게임은 오로지 정답만을 구하기 위한 것으로 본질적으로 물리 문제를 해결하는 것에 대한 성찰의 부재에서 기인하며 물리 문제를 푸는 것이 물리를 공부하는 것이라는 과도한 맹신에서 비롯된 것이다. 이러한 인식론적 편견은 물리 문제해결을 수학적 계산과정으로 한정지음으로써 물리 문제해결을 의미하는 물리학습으로 이어지게 하는데 가장 큰 걸림돌이 된다(Pepper *et al.*, 2012; Niss, 2017).



[그림 2-8] 수학으로의 음역에 대한 도식
(Tuminaro & Redish, 2007)

수학과 물리학의 관계에 대한 인식에서 겪는 어려움과 별도로 수학은 그 자체로 물리 문제해결의 주된 어려움이다(Byun & Lee, 2010; Jeong

et al., 2010; Nguyen & Rebello, 2011; Pepper *et al.*, 2012; Lim & Lee, 2015; Niss, 2017). Byun & Lee(2010)는 인터뷰, Weekly Report, 문제풀이 보고서 등을 분석한 결과 전공 역학 학습에서 대학생들이 느끼는 어려움 중의 하나는 수학 기술의 부족이라 보고하였다. 대학생들은 미분방정식, Taylor 급수, Fourier 급수 등에 의한 근사를 이해하는 데 어려움을 겪고 있는 것으로 나타났다(Byun & Lee, 2010). 이와 비슷한 맥락에서 Jeon *et al.*(2010)는 전공 역학 수업에서 학생들이 일차원 운동과 관련된 미분 방정식의 표현과 풀이에 대한 기초적이고 세부적인 내용, 수식을 물리적으로 해석하는데 어려움을 겪고 있음을 확인하였다. Nguyen & Rebello(2011)는 미적분학을 기반으로 한 일반 물리학 수업에서 대부분의 대학생들이 전자기학의 문제를 해결하는데 있어서 적분의 필요성을 인지하고 있지만 원하는 적분을 설정하는데 어려움을 겪고 있다고 보고하였다. 그는 이러한 어려움이 무한소와 무한히 더하는 것에 관한 개념을 완전히 이해하지 못하는데서 비롯된 것이라고 주장하였다. 또한 Pepper *et al.*(2012)는 대학생들이 벡터의 방향과 크기를 물리량과 연결하는데 어려움을 겪으며 도함수와 함수 값을 혼동하고 있는 것으로 보고하였다. 뿐만 아니라 대학생들이 발산(divergence) 개념을 적절히 이해하여 공간적 상황이나 전기장에 일관성 있게 적용하지 못하고 발산의 사전적인 정의에 의존하는 것으로 나타났다(Pepper *et al.*, 2012).

앞에서 언급한 연구 결과들이 대학생에 관한 것이었다면 Lim & Lee(2015)는 고등학생들이 역학 문제를 풀 때 겪는 어려움을 명제적 지식과 과정적 지식으로 나누어서 분석하여, 풀이(solution) 과정에서 관계식 활용 능력 부족과 관련된 어려움의 사례를 보고하였다. 구체적으로 고등학생들이 수학적 공식을 알고 있었음에도 공식에 대입할 변인값을 정확하게 찾지 못하거나 평균값을 구하기 위한 수학적 스킬이 부족한 경우를 사례로 제시하였다(Lim & Lee, 2015).

Niss(2017)는 물리 문제 상황은 수학적 세계로의 전환이 가능한 방식으로 구성되었다고 주장하며, 이를 수식화를 위한 구조(structure for

mathematization)라고 불렀다. 그는 대학생들이 짝을 이루어 유체 역학의 문제를 해결하는 과정을 분석한 결과 물리적인 실체에 관한 수학적 객체(object) 인식 부족, 수학적 체계화(systematization)의 미흡, 지나치게 복잡하게 설정된 수학적 객체 등을 수학과 관련해서 학생들이 겪는 어려움으로 보고하였다. Niss(2017)가 말하는 수학적 객체는 Halloun(2006)이 제시한 서술자(decitor)와 상당히 유사한데 서술자는 물리적인 실체(대상과 동인)를 표상함으로써 형태론적 양상을 서술하는 기하학적 개념이다(Halloun, 2006). 앞에서 언급한 연구들이 일반적인 관점에서 물리 문제해결에서 수학 개념에 대한 이해와 활용의 어려움을 기술한 것과 달리 Niss(2017)의 연구는 물리적인 대상을 수학적으로 표상하는 과정에서 학생들이 겪는 어려움을 명시적이고 구체적으로 제시했다는 점에서 의의가 있다.

수학과 관련된 물리 문제해결의 어려움을 종합해보면, 수학적 이해 혹은 기술의 부족에 관한 측면과 수식의 물리적인 의미를 이해하는 측면으로 나눌 수 있다. 이 두 측면을 독립된 영역으로 분리하여 분석한 연구도 있으나 물리학과 수학에 관계를 핵심 주제로 삼은 연구들에서 두 측면은 상호연관성이 있는 것으로 나타났다(Nguyen & Rebello, 2011; Pepper *et al.*, 2012; Niss, 2017). 또한 고등학생들을 대상으로 한 연구에서는 수학적 지식 그 자체보다는 수학적 지식의 활용이 어려움의 원인으로 나타난 반면(Lim & Lee, 2015), 일반 물리학이나 전공 물리학을 수강하는 대학생들을 대상으로 한 연구에서는 주로 수학적 지식의 이해 부족 자체가 어려움의 핵심적인 영역을 차지하고 있다고 정리할 수 있다(Byun & Lee, 2010; Jeong *et al.*, 2010; Lim & Lee, Nguyen & Rebello, 2011; Pepper *et al.*, 2012; Niss, 2017).

표상(representation)은 문제해결의 구성 요소 중의 하나로 문제해결자가 하나의 문제 상황을 내적 표상으로 변환하여 문제의 초기 상태에서부터 목표 상태까지의 범위를 지닌 문제공간을 통과하는 하나의 통로를 탐색할 때 문제를 해결할 수 있다고 하였다(Simon & Newell, 1978). Van

Heuvelen(1991)은 물리학자들은 물리적 과정을 이해하고 수학적 표현을 구성하는데 있어 정성적인 분석과 표상에 의지한다고 주장하였다. Van Heuvelen(1991)에 따르면 대학생들은 물리 문제를 해결할 때 다이어그램을 잘 사용하지 않으며 학생들이 다이어그램을 잘 사용하지 않는 이유로 학생들은 다이어그램이 나타내는 기본적인 변인들과 개념의 의미를 이해하지 못하고, 표상을 구성하는 기술이 발달할 기회를 제공받지 못했기 때문이라고 해석하였다. Kohl & Finkelstein(2008)은 일반물리학 수강생(초심자)과 대학원생(전문가)을 대상으로 물리 문제 해결과정에서 나타나는 다양한 표상의 양상을 연구하였다. Kohl & Finkelstein(2008)은 전문가와 초보자의 표상 사용에 있어 다양한 표상을 활용한다는 점에서 유사성을 보이지만 표상 사용의 유연성과 신속성에 있어 전문가가 더욱 능숙하다는 것을 확인하였다. Lim & Lee(2015)는 역학 문제해결의 문제이해 단계에서 시각적 인식 능력에 관한 고등학생들의 어려움이 확인되며 세부적으로는 그래프 해석 능력과 그림 해석 능력이 여기에 해당된다고 보고하였다. 또한 계획 단계에서의 문제 재구성과 관련해서 시각적 변환 능력, 즉 표상의 전환이 핵심적인 어려움으로 식별되었다(Lim & Lee, 2015).

마지막으로 논의할 학생들의 어려움은 물리 문제해결의 필수적인 요소인 명제적 지식(propositional knowledge)에 관한 것이다. 명제적 지식은 선언적 지식(declarative knowledge) 혹은 개념적 지식(conceptual knowledge)라고도 불리며 문제와 관련된 원리, 공식, 개념들에 대한 사실적 정보 또는 내용을 의미한다(Alexander & Judy, 1988; 박윤배, 1991). 과학에서의 문제해결은 해당 영역의 특정 지식으로 이루어진 지적 기반 없이는 불가능하므로(Reif & Heller, 1982) 물리 문제해결과 관련된 명제적 지식은 문제해결의 필수적인 요소이다. 명제적 지식과 관련된 많은 연구들이 초심자와 전문가가 가진 지식의 양과 질을 비교하는 형태로 진행되었다. 권재술, 이성왕(1988)은 [표 2-9]와 같이 물리 문제 해결에서 초심자와 전문가의 차이를 정리하였다.

[표 2-9] 초심자와 전문가의 지식 비교(권재술, 이성왕, 1988), 변태진(2012)에서 재인용

구분	초심자	전문가
일반적인 경우	해당분야의 지식이 적음 초보적인 조직 체계 문제해결 경험이 적음 논리적 사고력의 수준이 낮음	많은 지식을 가지고 있으며, 개념들이 무리지어 하나의 단위(chunk)로 기억 개념간의 위계가 잘 조직 논리적 사고력 사고력이 높음
물리 문제해결의 경우	물리학 전반에 걸친 지식이 적음 초보적인 위계조직 수학적 기능이 낮음	물리학 전반의 지식이 풍부함 수학적 기능 우수 잘 분화된 논리적 사고력

지금까지 논의한 결과를 종합해보면, 물리 문제해결에서 겪는 학생들이 겪는 어려움을 지식적인 측면에서 문제의 상황에 적절하게 이들을 적용하고 조직하는 과정과 그 결과에 관한 물리적인 해석과 관련된 측면으로 최근 연구의 흐름이 변해가고 있는 것으로 파악된다. 이러한 흐름은 내용 지식의 축적이나 반복적인 문제해결의 경험만으로는 물리 문제해결을 의미 있는 물리학습으로 유도하기 어렵다는 인식(변태진, 2012)에서 비롯된다고 판단된다. 또한 물리 문제해결에 관한 연구에서는 공통적으로 학생들이 물리적인 개념에 대한 이해와 활용에 있어서의 어려움을 지적하고 있으나 물리적인 개념의 이해와 활용이 구체적으로 무엇을 의미하며 어떤 관점에서 물리 문제해결과 연관되어야 하는지를 제시하는 연구들은 많지 않다. 이에 다음 절에서는 최근 과학교육계에서 대두되고 있는 모형구성 이론을 소개하고 앞에서 언급한 내용들과 관련하여 물리 문제해결에 어떤 이론적 시사점을 제공하는지 논의하고자 한다.

2.3. 모형구성

본 절에서는 과학교수학습에서 모형구성에 대한 전반적인 검토를 통해 물리 문제해결을 모형구성의 관점에서 어떻게 해석할 수 있는지를 논의하였다. 이 절의 마지막에서는 본 연구에서 사용할 모형구성의 분석틀이 어떻게 정리되었는지 상세히 설명하였다.

2.3.1. 모형(Model)과 모형구성

1) 모형

모형에 대한 정의는 학자들마다 분분하며 여러 학계에서 다양한 의미로 사용되고 있다(Halloun, 2006). 과학교육 분야에서는 모형의 광범위한 정의를 크게 두 가지 입장에서 정리하는 시각이 존재한다(이동욱, 2015). 첫째는 모형을 자연 현상의 특정 유형에 초점을 맞춰 물리적인 계를 추상화하고 단순화한 시스템 또는 표상이라고 보는 입장이다(Hestenes, 1987; Harrison & Treagust, 2000; Justi & Gilbert, 2005; Schwarz *et al.*, 2009). 이들의 관점에서 학습자의 모형이란 그림 혹은 도식의 표상으로 해석된다. 표상의 종류에 따라 모형은 세분화될 수 있는데 Gilbert(2005)는 모형을 구체적(concrete) 모형, 시각적(visual) 모형, 수학적(mathematical) 모형으로 구분하였다.

한편, 모형을 현상과 이론을 연계하는 설명 체계로 인식하는 입장도 있다(Clement, 2008; Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007). Halloun(2006)은 모형을 이론을 기반으로 하여 물리적 계의 구조나 행동에서 나타나는 특정한 유형을 기술하거나 예측하는 개념적 체계를 과학적 모형으로 정의하였다. 모형이 가설적 또는 이론적 설명 체계로써 이론을 기반으로 구성되지만 개념세계와 실제세계를 중재하는 역할을 하며 이론으로 전환되기도 한다(Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007). 이들의

관점에서 학습자의 모형이란 자연 현상이나 문제 상황에 대한 설명 체계로 해석된다.

모형에 관한 두 입장은 모형과 이론 간의 관계, 모형의 표상, 모형의 범위에 대해 각기 다른 해석을 내리고 있다. 그러나 모형이 자연의 모든 실체들을 표상하지 않고 특정한 대상이나 유형의 특징을 대리한다는 측면을 공통적으로 포함하고 있다. 본 연구의 참여자들은 이론적으로 추상화되고 개념화된 문제 상황에 대한 모형을 구성하므로 이론에 기반하여 설명 체계를 구성하게 된다. 따라서 본 연구에서는 모형을 문제 상황을 이해하고 기술하기 위한 설명 체계로 이해하였다.

2) 모형구성

일반적으로 모형구성은 특정한 대상이나 현상에 대한 설명 체계를 생성하기 위해 새로운 모형을 구성하거나 기존의 모형을 사용하는 과정이다(Hestenes, 1997; Lopes & Costa, 2007; Clement, 2008). 과학자들의 관점에서 모형구성은 자연 현상의 특정한 유형을 설명하고 예측하기 위한 이론을 생성해가는 과정이다(Halloun, 2006). 반면에 학습의 관점에서 모형구성이란 문제 상황이나 자연 현상에 대해 구성한 정신 모형(mental model)을 과학적이고 개념 모형(conceptual model)으로 변화시킴으로써 개념 세계를 확장해가는 과정이다(Greca & Moreira, 2002; Lopes & Costa, 2007).

정신 모형(Mental Model)은 현상에 대한 자발적인 모형(Duit & Glynn, 1996)으로 개별적으로 생성하거나 모둠 내에서 생성된 개인적 모형이다. 정신 모형은 불완전하고, 불안정하며, 비과학적이지만 학습자가 표상하고자 하는 물리적 계를 설명하고 예측한다는 점에서 모형구성에서 중요한 역할을 맡게 된다(Greca & Moreira, 2002).

개념 모형은 연구자, 교사, 기술자들이 계와 세계에 대한 이해를 돕기 위해 만든 것으로 대상이나 현상 및 상황에 대한 외적 표상(Nersessian, 1999)이므로 공동체의 과학적 지식과 일치한다(Greca & Moreira, 2002).

개념 모형은 정신 모형과 대조적으로 안정적이고 완전한 특성을 가지며 수학적 공식이나 비유(analogy), 물질적인 인공물(material artifacts)로써 구체화된다(Greca & Moreira, 2002, Halloun, 2006).

개념 모형은 물리적 실체를 부분적으로 표상함으로써 구성되지만 물리적 실체 혹은 실제 세계를 표상하는 물리적 모형(physical model)은 결국 개념 모형을 물상화(reification)함으로써 구성된다(Halloun, 2006). 즉, 과학적 방법론은 주로 다양한 개념적 도구를 사용하여 계의 특정 유형에 대응되는 개념 모형을 생성하고, 검증하고, 이용하는 것을 의미한다(Halloun, 2006). 예를 들어 등가속도 운동은 역학의 대표적인 개념 모형으로 가속도가 일정한 물체의 운동을 표상한다. 등가속도 운동 모형은 물체의 운동을 부분적으로 표상하지만 고등학생들은 등가속도 운동 모형을 통해 중력장에서 자유 낙하하는 물체에 관한 모형을 구성하게 된다.

학습자들은 모형구성을 통해 정신 모형의 가정을 명료화하고 모호함을 시정함으로써 개념 모형으로의 발달을 경험하게 된다.(Lopes & Costa, 2007). 학생들은 개념 모형을 통해 개념 간의 관계를 정립하고 개념 세계를 구조화한다(Lopes & Costa, 2007). 이를 통해 학습자의 개념 세계에 편입된 개념 모형은 물리적 계에 대한 모형을 구성하기 위한 개념 세계의 요소로 작동하게 된다.

3) 모형구성 도식(modeling schemata)

앞에서의 논의가 모형구성의 일반적인 정의와 관련된 것이었다면 Halloun(2006)은 모형구성에 관한 내적이고 암묵적인 도구를 모형구성 도식(modeling schemata)로 명명하고 모형의 구성 요소와 구조, 모형들 간의 관계, 모형과 개념 간의 관계를 구체적으로 제시하였다. 모형구성 도식은 모형 도식(model schema)과 개념 도식(concept schema)으로 세분화된다(Halloun, 2006). 모형 도식은 모형 영역(domain), 모형 요소(composition), 모형 구조(structure) 및 모형 조직화(organization)의 차원으로 구분된다(Halloun, 2006). 먼저 모형 영역은 모형이 자리하는 공

간으로 모형은 영역 의존적인 특성을 지닌다. 예를 들어 물리적인 계에 대한 복수의 모형이 서로 다른 영역 위치할 때 복수의 모형은 서로 다른 것으로 간주된다. 그러나 모형들이 같은 영역에 존재할 때 두 모형은 서로 다를 수 없다(Halloun, 2006). 모형은 과학 이론을 기반으로 하여 구조화되므로 모형 영역은 그 기반이 되는 과학 이론과 밀접하게 닿아있으며 이론의 대응 규칙(correspondence rules)을 준수한다(이동욱, 2015).

모형 요소는 물리적 세계의 구조나 과정에 대응되는 기능이나 대리하는 객체(Nersessian, 1995, NRC, 1996)를 의미한다. Halloun(2006)에 따르면, 모형 요소는 모형의 실체와 특성을 표상하는 개념들으로써, 실체 개념(entity concept)과 특성 개념(property concept)으로 나눌 수 있다. 실체 개념은 서술자(depictor)라고도 부르며 물리적인 물체(대상과 동인)를 표상하며, 실체 개념은 주로 표상된 물체의 형태론적 양상을 서술하는 기하학적 개념이다. 또 다른 개념인 특성 개념 혹은 기술자(descriptor)는 특정한 유형을 나타내는 계의 구조나 행동에서 일반적이고 중요한 특징을 표상하는 것이다(Reif & Heller, 1982; Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 이 때, 특성 기술자는 물리적 물체의 특성을 표상하는 대상 기술자와 물리적인 실체들의 상호작용을 표상하는 상호작용 기술자로 나뉘진다.

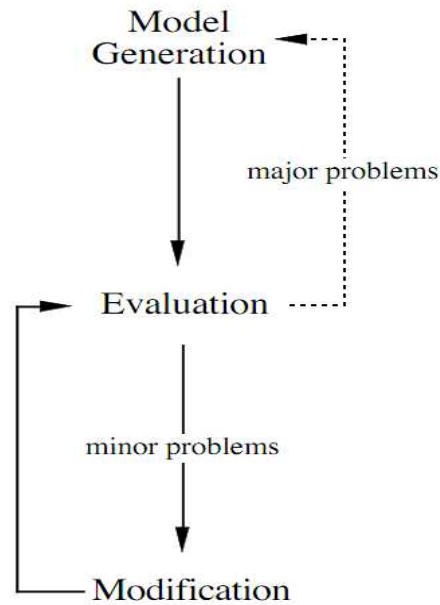
모형 구조는 모형구성에서 개념 세계를 바탕으로 추출된 모형 요소들을 조직화한 것으로 모형 구조는 모형 도식(model schemata)에서 가장 특징적으로 모형을 구별하고 확인할 수 있는 차원이다(Halloun, 2006; 이동욱, 2015). 모형 요소가 건물을 짓는 벽돌이라면 모형 구조는 일관된 개념적 체계에 의해 완성된 건물이라고 할 수 있다(Halloun, 2007). 모형 구조는 학생들이 내적으로 구성한 모형을 가장 특징적으로 대변하는 모형 도식이므로 학생들의 문제해결 과정을 분석하는데 있어 가장 핵심적인 정보를 제공한다(Halloun, 2006). 모형 구조는 세부적으로 위상기하 분면(topology facet), 상태 분면(state facet), 상호작용 분면(interaction facet), 인과 분면(causal facet)의 4가지 분면으로 구성된다(Halloun,

2006). 각각의 분면을 살펴보면, 먼저 위상기하 분면은 대상과 동인(agent)을 적절한 좌표계에 설정하는 것을 의미한다(Halloun, 2006). 상태 분면은 특정한 유형의 기술(description)과 관련되며(Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 적절한 상태 분면은 모형의 대상이 특정한 기준계에서 주어진 상태 기술자를 통해 시간에 따른 변화를 표현한다(Halloun, 2006). 즉, 물체의 초기 상태나 변화 상태에 대한 규칙성을 기술하거나 정의하는 분면이라 할 수 있다(Halloun, 2006). 상호작용 분면은 상호작용 기술자 사이의 상호작용 법칙으로 표현된다(Halloun, 2006; Hestenes, 1987). 예를 들면 만유인력 법칙이나 쿨롱의 법칙, 탄성체에 대한 후크의 법칙이 고전 물리학의 패러다임에서 전형적인 상호작용 법칙이다(Halloun, 2006). 인과 분면은 대상이 기준계 안에서 다른 대상이나 동인(agent)과의 상호작용에 의해 상태 기술자가 어떻게 변해가는 지에 대한 인과 관계를 설명한다(Halloun, 2006).

모형 조직화는 과학적 이론 안에서 모형들 사이의 관계와 위계를 정하는 것이다(Halloun, 2006). 모형 조직화는 모형이 위치하는 영역이 동일한 경우에만 가능하다.

4) GEM 순환

모형구성은 단지 모형을 생성하는 것만을 의미하지 않으며 모형의 평가와 수정까지도 포함한다(Hestenes 1987, 1997; Clement, 2008; Halloun, 2006). Clement(2008)는 모형구성 과정을 GEM 순환으로 설명하였다. GEM은 각각 Generation, Evaluation, Modification을 지칭하며, 초기 모형의 생성(G), 모형의 평가(E), 모형의 수정(M)이 순환적으로 일어남을 의미한다. GEM 순환은 초기 모형이 비판을 수용하여 수정되는 절차를 거쳐 더욱 복잡하고 정교한 일련의 모형들을 고안해가는 과정이다(Clement, 2008).



[그림 2-9] GEM 순환 (Clement, 2008)

2.3.2. 모형구성과 물리 문제해결

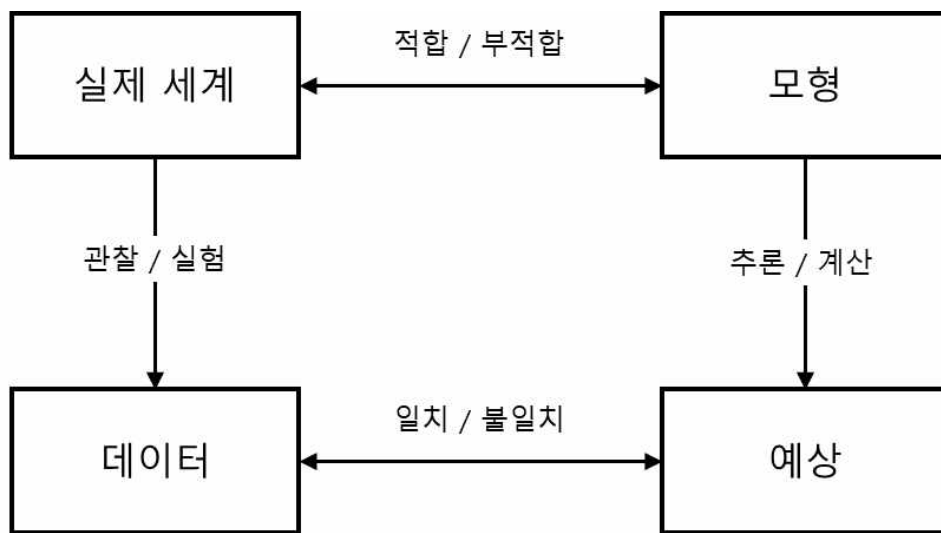
학생들이 정신 모형의 모호함을 시정하고 명료하고 공식화된 개념 모형을 구성하게 되었다고 하여 개념 체계로써의 모형 혹은 이론을 완전히 이해했다고 보기 어렵다(Greca & Moreira, 2002; Halloun, 2006). 물리학의 개념 모형들은 뉴턴 역학과 같은 과학 이론을 구성하는 하위 범주로써 대상을 대리하는 기술자(description)들의 관계를 통해 구체적으로 표현된다. 물리적인 계를 대리하지 않는 개념 모형은 기술자 간의 수학적 관계 혹은 구문에 불과하므로(Uhden *et al.*, 2012) 개념 모형을 기반으로 모형을 구성하고 이를 통해 현상에 대한 설명이 가능해질 때 비로소 개념 모형을 이해했다고 말할 수 있다(Nersessian, 1995; Greca & Moreira, 2002). 새로운 상황에 모형을 적용하는 활동은 학생들에게 개념 모형에 관한 더욱 의미 있고 확장된 지평을 제공하게 된다(Halloun,

2006). 이러한 관점에서 Hestenes(1992, 1997)는 물리 문제와 그 해결 방법이 과학적 지식의 단위가 아니라 모형이 과학적 지식의 단위임을 강조하며 대부분의 문제는 모형을 구성하거나 선택하는 모형 기반 추론(model-based inference)에 의해 해결된다고 주장하였다. 따라서 모형구성의 관점에서는 문제해결이란 학생들이 학습한 개념 혹은 개념 모형들을 문제 상황의 물리적인 계에 적용하고 수정함으로써 개념 모형과 이론을 정교해가는 일련의 과정이라 볼 수 있다(Hestenes, 1987; 1997; Brewe, 2008).

과학 이론의 의미는 계나 대상, 직접적인 관찰을 통해 인식되는 상황에 의해 표현되지 않으며, 이론과 실제 현상과의 관계는 항상 모형에 의해 매개된다(Gilbert *et al.*, 2000, Greca & Moreira, 2002; Uhden *et al.*, 2012). 그러나 모형의 매개는 실제적인 물리 현상이 아니라 물리 현상을 단순화(simplification)하고 이상화(idealization)한 물리적인 계를 기술함으로써 구현된다(Greca & Moreira, 2002). 물리적인 계는 자연의 물리적 현상이 아니라 인간에 의해 인위적으로 구성된 것으로 물리적 현상의 특정 유형 혹은 실체들의 특성을 부분적으로만 표상한다. 따라서 모형은 자연 세계가 아니라 물리적인 계 내부에서만 설명력을 갖게 되나 모형의 타당성은 실제 세계와의 비교를 통해 검증된다(Redish & Bing, 2009). Giere(1990)는 모형이 실제 세계와 이론 사이에서 실제 세계의 현상을 설명하며, 모형의 예상이 경험적 관찰 혹은 실험 결과와 일치할 때 모형이 현상에 대한 설명력을 갖게 된다고 보았다[그림 2-10]. 물리적인 계를 어떻게 설정하는가는 구성하고자 하는 모형이 속한 이론의 대응 규칙에 따라 달라진다(Greca & Moreira, 2002; Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007).

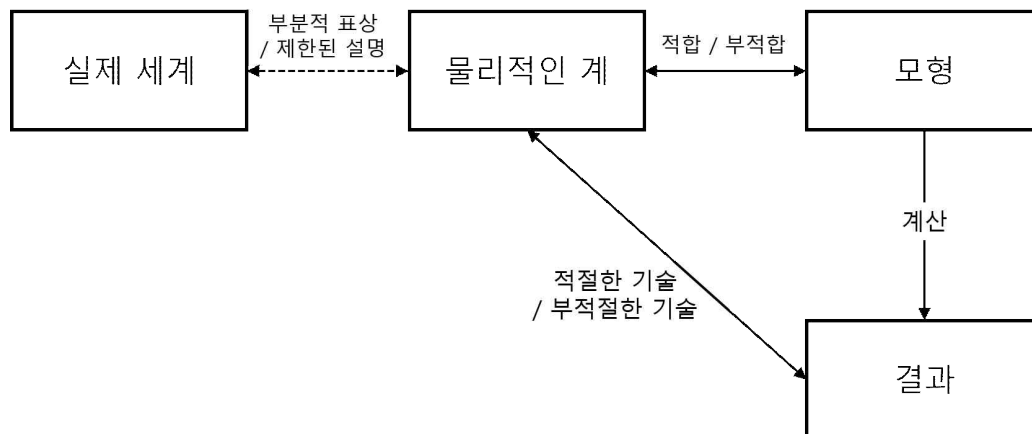
물리 문제해결과 실험 활동 모두 개념 모형을 적용하여 결과를 설명할 수 있는 모형을 구성하는 활동이다. 그러나 실험 활동에서는 모형을 통해 물리적인 계가 구체화되지만 물리 문제해결에서는 물리적인 계가 문제 상황으로 직접적으로 제시된다는 점에서 차이가 있다(Maloney,

1994). 즉, 물리 문제해결이 실제 세계가 아닌 이를 부분적으로 표상하고 있는 물리적인 계를 대상으로 하는 모형구성 활동이라는 점에서 문제에 대한 모형은 실제 세상에 대한 제한적인 설명만이 가능하다[그림 2-11]. 또한 데이터와의 일치 여부를 확인하는 실험 활동과 달리 물리 문제해결은 물리적인 계에 적합한 개념 혹은 개념 모형을 기반으로 기술했는가 여부로 그 적합성이 판별된다(Halloun, 2006).



[그림 2-10] 실제 세계의 매개체로서의 모형(Giere, 1990)

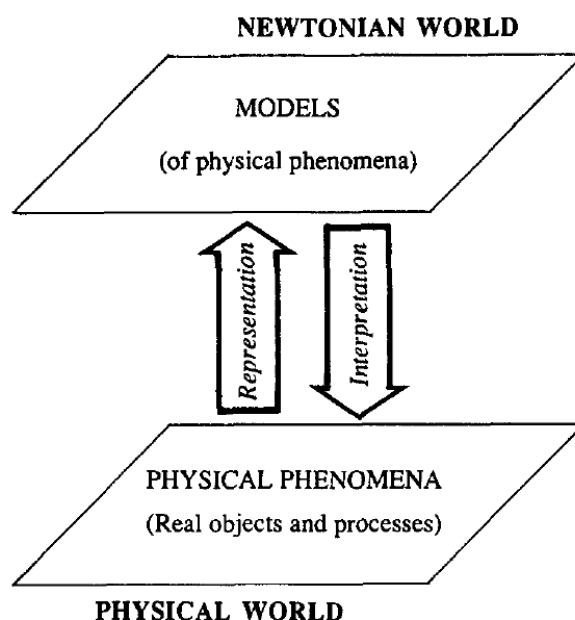
실제 세상이 아닌 물리적인 계에 대한 모형을 구성한다는 점에서 물리 문제해결은 새로운 과학적 지식 혹은 모형을 생성하는 귀납적인 과정은 아니다(Hestenes, 1992). 물리 문제해결은 모형 예증(adduction), 모형 연역(deduction)과 관련된 활동으로써 물리적인 계에 대한 모형을 구성하기 위한 조건들을 명료화하는 과정이다(Halloun, 2006). 학생들은 이러한 과정을 거침으로써 정신 모형을 개념 모형으로 변화시키고 개념 모형의 기능을 더욱 폭넓게 이해하게 된다(White & Frederiksen, 1990; Halloun, 2006).



[그림 2-11] 모형구성 관점에서 해석한 물리 문제해결 과정

물리 문제가 주로 물리적인 계를 대상으로 이루어진다고 하여 실제 세계의 현상에 관한 문제해결이 완전히 논외의 것은 아니다. Lopes & Costa(2007)의 상황 문제(situation-problem)는 단순하고 이상화된 것으로 물리적인 계가 아니라 실제 세상을 대상으로 한다. 이를 위해서는 실제 세상을 물리적인 계로 표상하는 과정에 대한 구체적인 논의를 필요로 한다. Lopes & Costa(2007)가 제시한 모형구성 요소 중 개념화(conceptualization)는 실제 세상을 물리적인 계로 표상하는 구체적인 방안에 관한 것이다. 대상과 사건에 관한 개념화들의 일관성을 확인하는 것은 이론과 모형, 개념의 정합(Halloun, 2006)으로 이해될 수 있다. 즉, 학생들이 이상화된 물리적인 계가 아닌 실제 자연 현상에 대한 설명 체계, 모형을 구성하기 위해서는 실제 세계의 현상을 이론의 영역에 위치시켜 물리적인 계로 표상하는 활동이 요구된다. 그러나 중등학교 현장에서 이러한 형태의 문제해결은 드물며 대부분 이상화되고 단순화된 표준 문제들에 대한 활동이 주를 이룬다. 이로 인해 학생들에게 물리 이론은 이론적인 세상에서만 존재하며 실제 세상에 구현 가능성이 없는 것으로 간주되고 있다. Lopes & Costa(2007)의 연구는 실제 세계의 현상에 관한 문제해결 활동이 무엇을 의미하며 이를 위해 어떤 능력의 함양이 필요한지 구체적으로 제시하고 있다는 점에서 그 의미를 찾을 수 있다.

한편, 모형구성의 관점을 통해 물리 문제해결에 학생들이 겪는 어려움에 대한 더욱 명료한 해석이 가능하다. 2.2.2절에서 언급한 바와 같이 많은 학생들은 물리 문제해결을 공식들의 적절한 공식을 조합하는 수학적 계산과정으로 인식하고 있다. 이를 모형구성의 관점에서 보면 많은 학생들이 답을 도출하는데 그치며 모형을 통해 물리적인 계를 해석하는 과정을 수행하지 않기 때문에 해석할 수 있다. 모형은 주어진 상황에 대한 답을 제공할 뿐만 아니라 계의 특정 유형을 해석하고 설명하는 기능을 갖는다(Hestenes, 1987, 1992; Greca & Moreira, 2002; Halloun, 2006) [그림 2-12]. Hestenes(1992)은 문제해결에 대한 인식론적 편견은 모형의 설명적 기능을 강조함으로써 극복할 수 있다고 믿는다. 즉, 학생들이 물리 문제해결이란 이론의 영역 안에서 문제 상황에 대한 설명 체계를 구성하는 과정임을 인식하여 수행한다면 단순한 정답 찾기 이상의 물리적 의미를 이해할 수 있다는 것이다(Hestenes, 1992).



[그림 2-12] 모형과 물리적 현상의 관계
(Hestenes, 1992)

또한 Brew(2008)는 문제해결은 모형을 개발하고 적용하는 과정임을 강조하고 이를 통해 다른 과학 혹은 공학 분야에서도 전이될 수 있는 모형구성 능력을 기를 수 있음을 강조하였다.

마지막으로 모형구성 이론은 문제해결과 관련된 많은 선행연구들이 제시하고 있는 명제적 지식과 절차적 지식에 대해 새로운 입장을 제시한다. 모형구성의 관점에서 명제적 지식은 개념 도식(concept schemata)이며 절차적 지식은 모형 도식(model schemata)로 이해될 수 있다. 개념 도식은 개별모형을 구성하는데 필요한 개념들의 구성과 활용에 관한 서식(template)으로 범위, 표상, 조직화, 수량화로 세분화된다(Halloun, 2006). 학생이 개념 도식 중 하나의 차원만을 알고 있다고 하여 개념을 온전히 이해하고 있다고 할 수 없다. 개념은 모형의 요소로써 모형의 구조를 만들어가는 과정을 통해 그 물리적인 의미가 분명해진다(Halloun, 2006). 또한 개념들은 모형 안에서 다른 개념 간의 관계 맺음을 통해 과학 이론을 구성하는 법칙과 기본 모형으로 작동하기도 한다(Halloun, 2006). 따라서 명제적 지식에서 말하는 개념, 법칙, 이론 등은 각자가 독립적이고 개별적인 지식이 아니라 상호 연관된 체계이며, 물리적인 현상이나 계에 관해 모형을 구성하는 과정을 통해 그 물리적인 의미가 분명해진다. 모형 도식은 개념 도식을 통해 물리적인 계와 관한 모형을 구성하기 위한 정신적 도식(Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007)이다. 결국 모형구성 관점에서 명제적 지식과 절차적 지식은 독립적인 지식 체계가 아니며 상호 보완과 결합을 통해 학습되어 가는 인지적 도식, 즉 모형구성 도식(modeling schemata)이다(White & Frederiksen, 1990; Halloun, 2006). 따라서 물리학습에서 지식의 단위는 이론을 구성하는 개념 모형으로 새롭게 전환되어야 한다(Hestenes, 1997; Brew, 2008). 모형구성 관점을 도입함으로써 개념의 이해와 활용 방법의 습득이라는 모호하고 일반론적인 이분법적 사고에서 벗어나 물리 문제학습이 지향하는 바를 더욱 구체적으로 이해할 수 있다.

본 연구에서는 앞에서 논의한 선행 연구들을 바탕으로 모형구성 관점

에서의 물리 문제해결을 다음과 같이 정의하고자 한다.

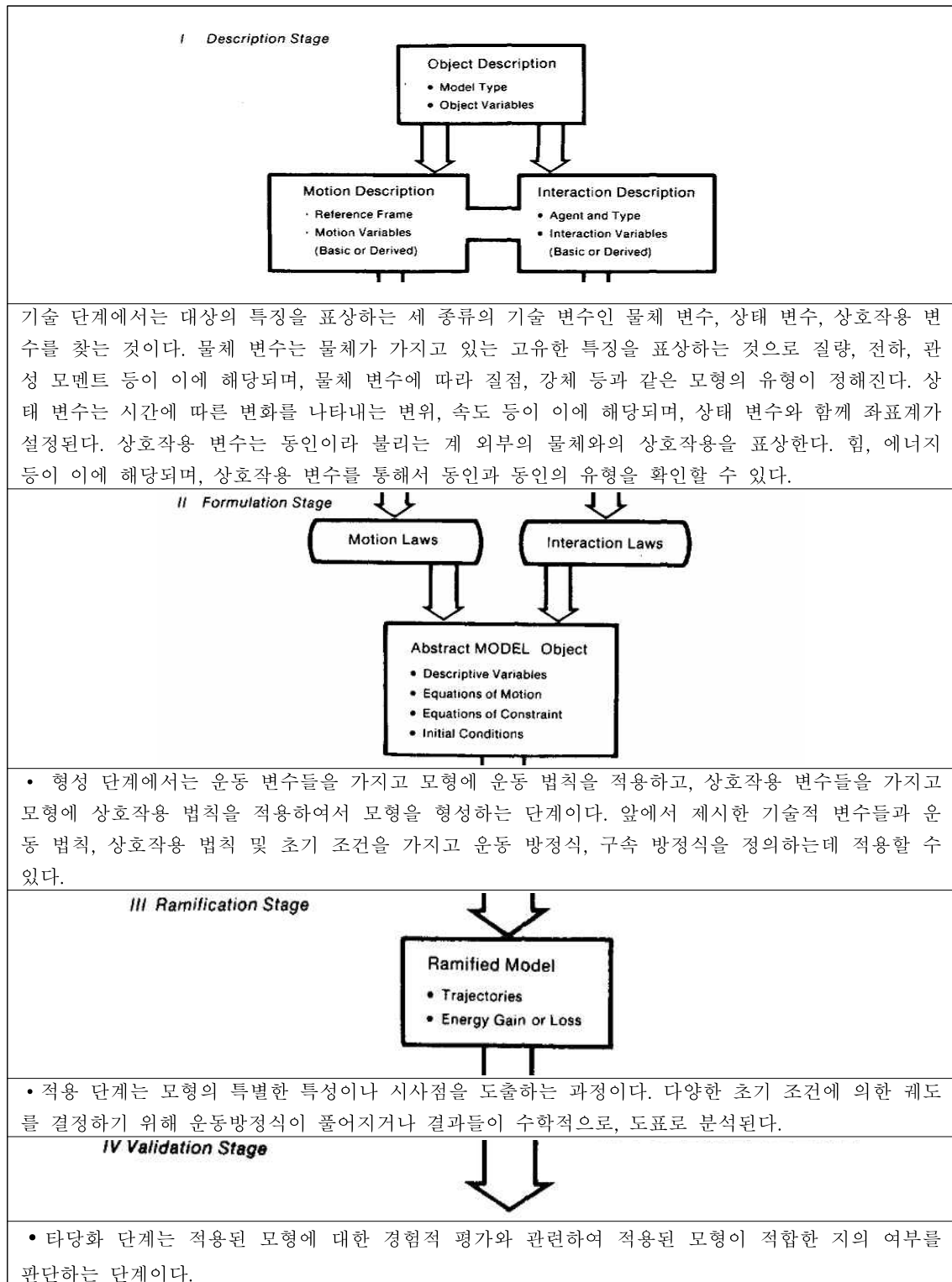
“물리 문제해결이란 학습자들이 사전에 가지고 있던 개념 세계를 기반으로 문제 상황에 대한 설명 체계, 즉 모형을 구성해가는 일련의 탐구 활동을 의미한다.”

2.3.3. 모형구성의 분석틀

본 절에서는 물리 문제해결을 모형구성 관점에서 해석한 선행 연구들을 참고하여 본 연구에서 사용할 모형구성의 분석틀을 제안하고자 한다.

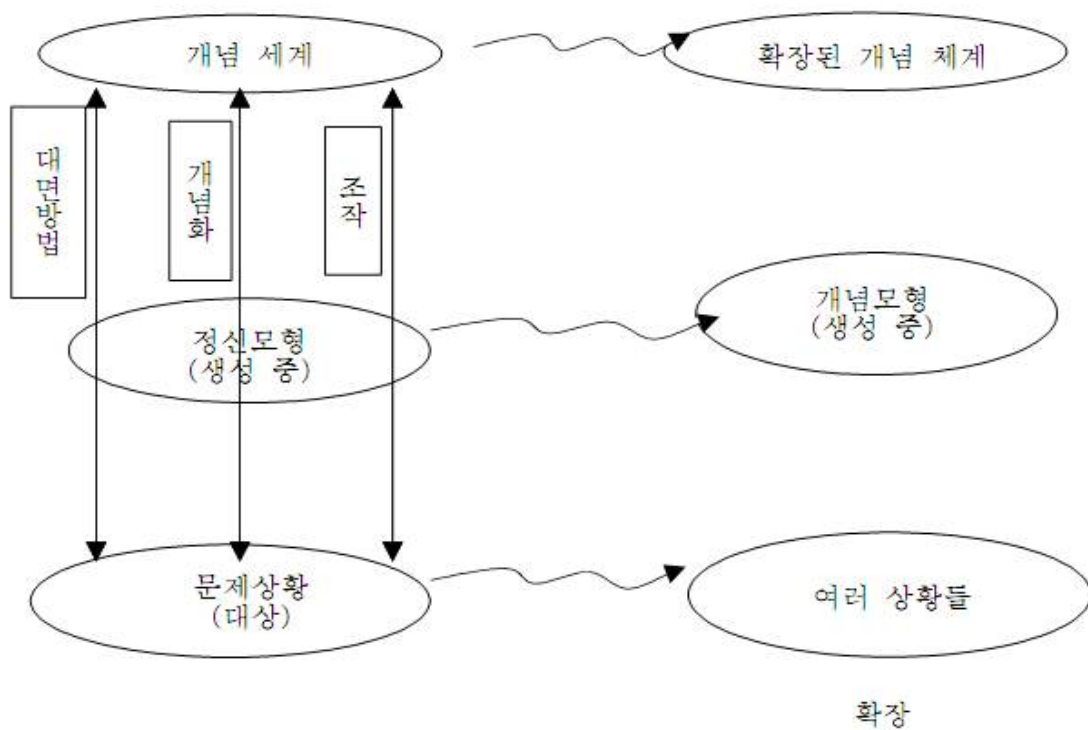
먼저, Hestenes(1987)은 물리적 상황에 대한 모형을 생성하기 위해 이론을 적용하는 인지적 과정을 모형구성으로 정의하고 물리 문제해결 과정을 수학적 모형구성의 과정으로 이해할 수 있다고 주장하였다. Hestenes(1987)에 따르면 수학적 모형은 다음과 같은 4가지 구성 요소를 가지고 있다. 모형에서 표상이 되는 대상(object)과 대상과 상호작용 하는 동인(agents), 대상의 특징을 표상하는 세 종류(대상, 상태, 상호작용)의 기술자들(descriptor), 모형의 구조와 시간에 따른 변화를 기술하는 모형의 방정식, 기술 변수들과 모형이 표상하고 있는 대상들의 특징을 연결시키는 해석이 4가지 구성 요소이다. Hestenes(1987)의 물리적 대상에 관한 4가지 구성 요소를 구성하기 위해 과학적, 수학적 지식을 적용하여 모형을 구성하는 단계를 [표 2-10]과 같이 제시하였다.

[표 2-10] 역학에서의 모형구성 단계(Hestenes, 1987)



Hestenes(1987)의 연구는 물리 문제해결을 모형구성의 관점에서 해석한 선구적인 시도라는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다. 그러나 모형구성의 역동적인 상황을 지나치게 선형적으로 해석했다는 점과 이론과 개념 세계의 역할이 모형구성에서 명확하게 드러나지 않는다는 점에서 비판의 소지가 있다.

Lopes & Costa(2007)는 모형구성 능력을 정보와 지식을 동원, 선택, 사용하여 상황을 효과적으로 표현하는 능력이라고 하였다. Lopes & Costa(2007)는 [그림 2-13]과 [표 2-11]과 같이 문제 상황에 대한 모형구성 능력을 개념화하기 위하여 모형구성의 차원을 도입하였다



[그림 2-13] 모형구성 능력 차원(Lopes & Costa, 2007)

[표 2-11] 모형 구성 차원의 세부 항목과 정의(Lopes & Costa, 2007)

모형구성 요소	세부 항목	조작적 정의
대면	개념의 특성 혹은 개념 간의 관계를 사용하기 위한 조건	특정한 실험적 조건과 추론 조건의 존 재 유무를 기준으로 개념의 특성 혹은 개념 간의 관계를 적용하는 것에 대한 적합성을 분석
	상황-문제에 대한 주의 깊은 분석	추론 조건의 설명 수단과 답의 유형을 통해 학생들이 상황을 주의 깊게 분석 했는지, 아니면 공식을 즉각적으로 사 용했는지를 확인
개념화	대상의 개념화	학습자가 대상의 특성을 유추
	사건의 개념화	학습자가 사건의 특성을 유추
	적합성과 일관성	대상과 사건의 개념화가 문제 상황에 적합하고 상호 간에 일관성이 있는지 평가
	변인들 간의 관계	물리적이고 정량적 변인들의 관계를 일관되게 기술
조작	관계들의 유형	관계가 정성적인지, 정량적인지 아니면 결정할 수 없는지를 확인
	사용된 정량적 변인들	사용된 정량적 변인들을 열거
	예측 능력	답이 시간에 따른 정량적 변인들의 변 화를 예측할 수 있는 능력을 가졌는지 확인
	특정 조작의 명료화	시간에 따른 분리, 좌표계 선택, 계와 상호 작용의 식별, 벡터의 분해와 같은 특정이고 반복적인 절차를 인식
	상징적 언어	사용된 언어들의 유형을 기술

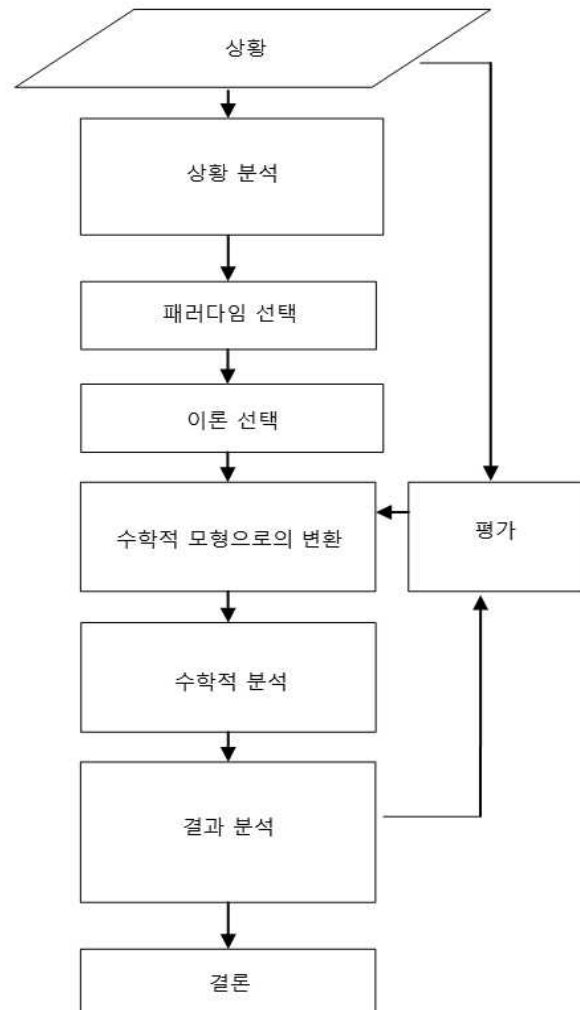
모형구성의 차원은 대면(way of facing), 개념화(conceptualization), 조작(operative work)의 세 차원으로 이루어진다(Lopes & Costa, 2007). 대면은 학생들이 상황-문제(situation-problem)를 분석하는 방식과 개념이나 개념들 사이의 관계에서 그 특성들의 사용 조건과 관련된다(Lopes & Costa, 2007). 개념화는 대상(object), 사건(event), 혹은 전체 상황-문제를 개념화하기 위해서 정신적 도식(mental schema)를 동원하여 개념들 간에 일관성이 있는지 상황-문제에 적합한지 확인하는 과정을 의미한다(Lopes & Costa, 2007). 조작은 답을 찾기 위해서 변수들이나 절차들 사이의 관계와 같은 정신적 도식(mental schema)의 양상과 함께 상징적 표현 체계를 사용하는 것을 나타낸다(Lopes & Costa, 2007).

Lopes & Costa(2007)의 연구는 모형구성에 필요한 역량을 세분화하여 기술하는 것이 목적이었으므로 [표 2-11]을 모형구성 과정 혹은 절차로 해석할 수는 없다. 그러나 상황 문제에 대한 모형을 구성하기 위한 개념 세계의 역할과 모형과의 관계를 시각적으로 제시함으로써 Halloun(2006)과 Hestenes(1987, 1997)에 비해 모형구성에서 개념 세계의 역할을 구체적으로 설명하고 있다. 또한 정신 모형이 개념 모형으로 발달되는 과정을 거쳐 학습자의 개념 세계가 확장되고 설명할 수 있는 상황의 폭이 넓어진다는 관점은 모형구성 이론에서 주장하는 물리학습에서의 개념 이해와 발달에 관해 구체적인 상을 제시한다.

Niss(2012)는 이상화되고 단순화된 물리적인 계가 아닌 실제 세계에 대한 문제해결을 모형구성에서 해석하였다. 실제 세계는 전형적인 물리의 언어로 표현되어 있지 않으므로 물리학을 사용하여 이해할 수 있는 형태로 재구성되어야 한다. 이 단계를 상황 분석이라 부르며 실제 세계의 특정 맥락을 중심으로 물리적인 계는 이상화되고 단순화된다(Niss, 2012). 다음 과정은 문제를 해결하기 위해 어떤 이론을 사용할 것인가를 결정하는 패러다임 선택이다. Niss(2012)가 말하는 패러다임 선택은 실제 세상에 대한 문제를 결정할 때는 매우 중요한 단계임이 분명하나 표준화된 문제의 경우 고전 역학과 상대성 이론 중 어느 것을 선택하여 문

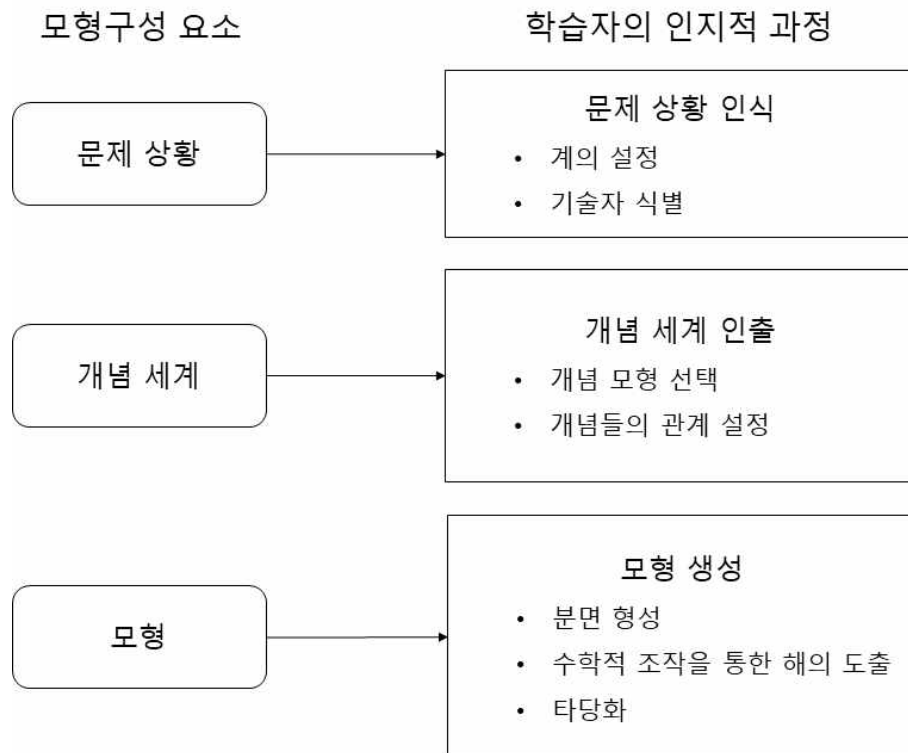
제를 해결한 것인가와 같은 선택을 할 경우는 거의 없다. 그러나 고전 역학이라는 패러다임 내에서 뉴턴 역학을 사용할지 랑그라주 역학을 사용할지에 대해서는 학습자가 결정할 여지가 있다. 이와 같이 선택된 패러다임 내에서 적절한 이론 혹은 원리를 선택하는 것이 이론 선택 과정이다. 이론을 선택한 학습자는 물리적 구조를 수학적 구조로 변환시키는 과정을 수행하게 되는데, 이를 수학적 모형으로의 변환이라고 부른다(Niss, 2012). 이는 문제의 상황을 수학적인 용어로 기술함은 물론, 수학적인 방정식으로 표현하는 것을 포함한다. 이때 수학적으로 표현된 법칙과 기본 모형들이 물리적인 계의 구조에 적용된다(Niss, 2012). 결과를 도출하기 위하여 학습자들은 수학적인 방법을 통해 구성된 모형을 분석하게 되는데 이를 수학적 분석이라고 한다(Niss, 2012). 수학적 분석 결과를 통해 모형은 물리적인 계의 특정 유형 기술하게 된다(결과 분석). 최종적으로 모형은 문제의 본래 목적과 내적 타당성에 의거하여 평가받게 되며(평가), 모형이 적합하다는 평가가 내려진다면 실제 세계의 상황은 모형의 결과를 통해 묘사된다(결론)(Niss, 2012).

Niss(2012)의 관점은 모형구성의 관점에서 패러다임과 이론, 수학을 문제해결과 매끄럽게 연결하여 기술하고 있다. Hestenes(1987)와 달리 이론의 선택과정을 부각했다는 점 역시 문제해결의 핵심적인 과정을 모형구성 관점 적절하게 기술했다고 평가할 수 있다. 그러나 표준화된 문제 상황이 아닌 자연의 실제 상황에 대한 문제해결을 분석의 대상으로 했기 때문에 표준화된 문제를 다루는 본 연구의 맥락과 다소 어긋난다. 또한 기본 모형을 선택하고 적용하는 과정을 수학적 모형으로의 변환에 포함시킴으로써 모형의 구조를 생성해가는 과정에서 수학적인 측면을 지나치게 강조한 부분이 없지 않다.



[그림 2-14] 모형구성으로서 문제해결
(Niss, 2012)

앞에서 다룬 선행 연구들의 관점을 바탕으로 본 연구에서 정의하는 모형구성의 분석틀에 대한 논의를 시작하고자 한다. 앞 절에서 정의한 바와 같이 물리 문제해결은 학습자가 사전에 가지고 있던 개념 세계를 기반으로 문제 상황에 대한 설명 체계, 즉 모형을 구성하는 과정으로 이해할 수 있다. 따라서 물리 문제에 대한 모형 구성은 문제 상황, 개념 세계 및 모형, 이 세 가지 요소에 관한 인지적 과정을 통해 구체화된다고 할 수 있다.



[그림 2-15] 모형구성 요소와 학습자의 인지적 과정

먼저 문제 상황 인식은 문제 상황의 정보들을 분석하여 물체들을 대상과 동인으로 구별하여 계를 설정하고, 계의 상태와 상호작용을 기술자(descriptor)로 인지하고 이들을 식별함을 의미한다(Hestenes, 1987, 1997; Halloun, 2006). 기술자란 특정한 유형을 가지는 계의 구조나 행동에서 일반적이고 중요한 특징을 표상한 것으로 대상의 운동을 기술하고 다른 물체들과의 상호작용을 통해서 변할 수도 있는 특성을 표상하는 것이다(Reif & Heller, 1982; Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 상호작용 기술자란 두 개 혹은 그 이상의 물리적 실체들이 서로에게 작용하는 상호작용을 표상하는 것으로, 상호작용 기술자는 계 내부에서 대상들의 상호작용(내부 상호작용)을 표상하기도 하며 계 외부의 동인과 대상의 상호작용(외부 상호작용)을 표상하기도 한다(Halloun, 2006). 상태 기술자는 대상의 위치, 운동에 관한 것으로 물리적 물체의 행동을 특징짓고 다른

물체들과의 상호작용을 통해서 변할 수도 있는 특성을 표상한다(Hestenes, 1987; Halloun, 2006). 속도, 운동량, 가속도 등이 상태 기술자의 예이다.

문제 상황 인식을 바탕으로 학습자는 계의 상태를 기술하고 설명하기 위해 자신의 개념 세계에서 적절한 요소들을 선택하게 되는데 이를 개념 세계 인출(retrieval)로 정의하였다. Hestenes(1987)가 기술자를 이론과 법칙에 어떻게 연관시키는가에 대한 명확한 설명을 하지 않은 것과 달리 Halloun(2006)은 개념 모형의 대응 규칙 하에 계의 기술자들이 조직되고 연관된다고 주장한다. 즉, 개념 세계의 인출은 개념 모형의 선택을 중심으로 이루어지는데, 개념 모형이란 이론에서 다루는 전형적인 현상에 대한 외적 표상을 의미하며(Nersessian, 1999) 기본 모형(Basic model), 일반 모형(General model) 등으로 불린다. 개념 모형은 공동체의 물리적 지식의 단위인 동시에 개념들의 관계를 규정하는 역할을 함으로써 이론의 하부 요소를 구성한다(Hestenes, 1997; Greca & Moreira, 2002, Halloun, 2006; Lopes & Costa, 2007; Brewster, 2008). 따라서 어떤 개념 모형을 선택하는가에 따라 연관되는 개념들의 특성과 관계가 다르게 설정된다. 결국 개념 모형 선택은 단순한 공식의 상기가 아니라 계의 특성에 부합되도록 개념들의 표상인 기술자들의 관계를 설정하는, 개념 세계 인출의 핵심적인 과정으로 볼 수 있다. 고등학교 물리에서 다루는 뉴턴 역학의 대표적인 개념 모형으로 등가속도 운동, 등속직선 운동을 들 수 있다. 계가 일정한 가속도로 운동하는지 일정한 속도로 운동하는지에 따라 학습자가 선택하는 개념 모형은 달라진다. 이때 계의 상태를 표상하는 거리와 속도, 가속도 등의 상태 기술자들은 등가속도 운동 모형에서 $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ 로, 등속직선 운동에서는 $s = vt$ 로 각각 그 관계가 다르게 설정된다.

선택된 개념 모형을 토대로 학습자는 문제 상황을 기술하는 모형을 생성하게 된다. Hestenes(1987)은 모형을 상태와 상호작용의 수식으로 모

형을 제안했으나 이는 모형의 기술적인 특성만을 염두에 둔 것이다. 모형은 그 역할에 따라 설명적인 기능을 수행하기도 하므로(Halloun, 2006) 상태와 상호작용 측면만으로 모형의 전체적인 구조를 기술하기에는 부족하다. Halloun(2006)은 이에 대해서 네 가지 모형 도식(model schemata) 중에서 모형의 전체적인 특징을 드러내는 것은 바로 모형 구조라고 주장하였다.

모형 구조는 위상기하 분면, 상태 분면, 상호작용 분면, 인과 분면으로 세분화된다. 위상기하 분면은 대상의 상태 혹은 상태 변화를 기술하기 위한 좌표계 설정과 관련된 것이다(Halloun, 2006). 상태 분면은 모형의 대상이 특정한 기준계에서 주어진 상태 기술자를 통해 시간에 따른 변화를 표현한다(Halloun 2006). 즉, 물체의 초기 상태나 변화 상태에 대한 규칙성을 기술하거나 정의하는 분면이라 할 수 있다(이동욱, 2015). 상태 분면에서 상태의 규칙성은 속도, 가속도, 위치 등의 상태 기술자로 표현되며 이들 사이의 관계는 개념 모형의 대응 규칙에 따라 결정된다. 상호작용 분면은 상호작용 기술자 사이의 상호작용 법칙으로 표현되며(Hetenes, 1987; Halloun 2006), 계의 설정에 따라 내부 상호작용과 외부 상호작용이 구분되어 상호작용 분면을 구성하게 된다. 고등학교 물리 I에서 다루는 대표적인 상호작용으로는 중력, 장력, 마찰력 등을 들 수 있다. 인과 분면은 대상이 기준계 안에서 다른 대상이나 동인(agent)과의 상호작용에 의해 상태 기술자가 어떻게 변해가는 지에 대한 인과 관계를 설명한다(Halloun 2006). 뉴턴 역학 내에서는 운동 2법칙을 통해 인과 관계를 기술한다. 이와 비슷하게 Hestenes(1997)도 그의 후속 연구에서 모형의 구조를 기하학적 구조, 상호작용 구조, 상태 구조, 시간(temporal) 구조 등으로 Halloun(2006)의 모형 분면과 거의 동일하게 세분화하였다.

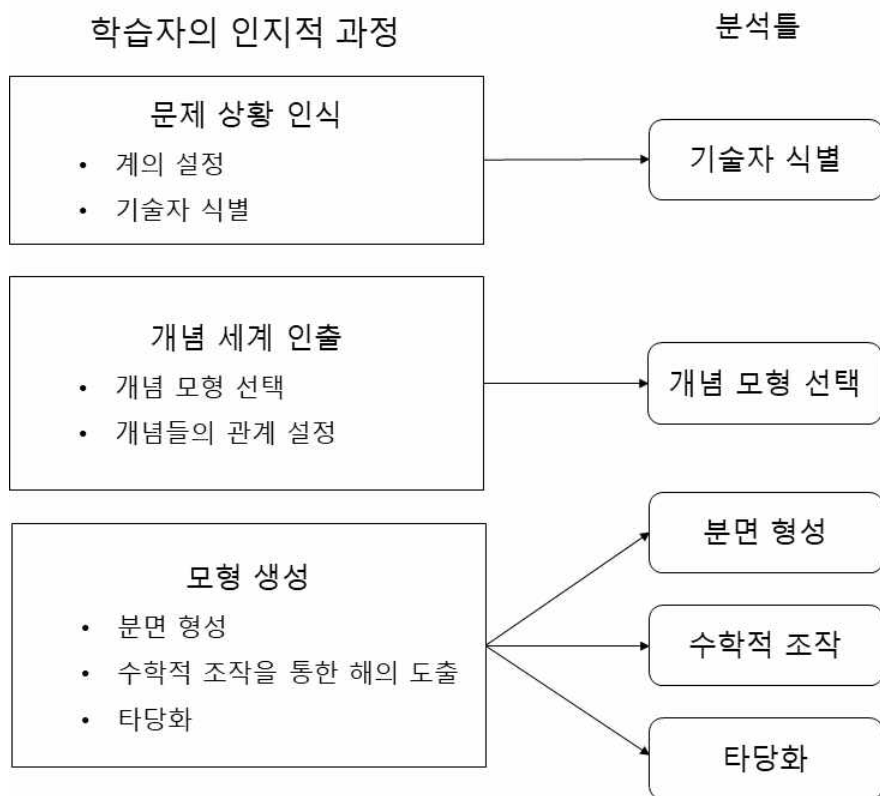
본 연구에서는 모형의 구조를 형성하는 인지적 과정을 분면 형성으로 정리하였으며, 모형의 구조는 상태 분면, 상호작용 분면, 인과 분면으로 구체화된다.

분면들에 대한 수학적 분석과 계산을 통해 학습자는 문제 상황에서

요구하는 대상의 상태나 상호작용 등에 관한 해를 도출해야 한다(Niss, 2012). 본 연구에서 이러한 인지적 과정을 수학적 조작으로 정의하였다. 이 과정에서 문제의 정량적인 초기 조건들이 모형에 적용되며, 표상간의 전환이 이뤄지기도 한다(Hestenes, 1987; Lopes & Costa, 2007). 타당화는 수학적 조작 결과 도출된 해를 기준으로 모형의 대응 여부를 판단하는 단계이다. 본 연구에서는 문제 상황에 적합한 해가 도출되어 모형이 타당한 설명력을 가지게 되는 것을 모형 대응(model correspondence)이라고 정의하였다. 모형 대응의 기준을 크게 모형 내적인 요인과 외적인 요인으로 나뉘서 살펴볼 수 있다. Niss(2012)는 내적 요인을 타당성(validity), 외적 요인을 목적(purpose)의 부합으로 나뉘서 모형의 대응 기준을 제시하였다. 타당성은 모형이 문제 상황의 물리적인 계를 적합하게 대리하고 있는지를 의미하며 이를 위해 분면 간의 정합과 수학적 일관성을 내포하고 있어야 한다(Bing & Redish, 2009; Niss, 2012; Lee & Yoo, 2017). 문제 목적과의 부합은 모형이 문제에서 요구하는 정밀함을 충족하거나 문제에서 제시하고 있는 보기 중의 하나와 모형의 해가 일치해야 함을 의미한다(Hestenes, 1997; Niss, 2012).

모형구성 요소에 관한 학습자의 인지적 과정 분석을 통해 본 연구의 모형구성 분석틀을 [그림 2-16]과 같이 정의하였다. 학습자의 인지적 과정을 모형구성의 분석틀로 그대로 활용하지 않지 않은 이유는 학습자의 인지적 과정은 모형구성에 관한 이론적 논의이며 실제 학습자들의 모형구성은 이와 다르게 진행되거나 명시적으로 확인하기 어려운 요소들을 포함하기 때문이다. 그 대표적인 예로 계의 설정을 들 수 있다. Ji *et al.*(2016)에 따르면 많은 물리교육을 전공하는 대학생들조차 계의 설정과 구분, 요소에 대한 명확한 인식이 없거나 이를 역학 문제해결에 활용하지 않고 있다. 따라서 문제 상황 인식에서 명확하게 계를 설정하지 않고 대상들의 기술자만을 식별한 뒤 모형 생성에서 계의 설정이 일어날 수도 있다는 점에서 문제 상황 인식에서 기술자 식별만을 분석의 대상으로 선정하였다. 또한 개념 세계 인출에서 개념 모형 선택만을 분석틀에 포함

시킨 이유는 학생들의 모형구성 과정에서 개념 모형 선택과 개념간의 관계 설정간의 구분이 명확하지 않기 때문이다. 실제 학교 현장에서 학생들은 개념 모형에 대한 인식이 불분명하며 개념들의 관계를 직접적으로 문제 상황에 적용하기도 한다(Lopes & Costa, 2007). 또한 개념 모형의 선택은 그 자체로 개념들의 관계 설정을 의미하기도 한다(Halloun, 2006). 따라서 모형구성의 분석틀에서는 이 둘을 구분하지 않고 개념 모형 선택으로 통합하여 개념 세계 인출을 분석하고자 한다.



[그림 2-16] 본 연구의 모형구성의 분석틀

[표 2-12]에서 본 연구의 모형구성 분석틀의 정의에서 참고했던 선행 연구들의 모형구성과 본 연구의 모형구성의 과정을 비교하여 정리하였다. [표 2-13]에서는 분석틀의 각 단계에 대한 설명을 요약하였다.

[표 2-12] 본 연구와 선행 연구의 모형구성 과정 비교

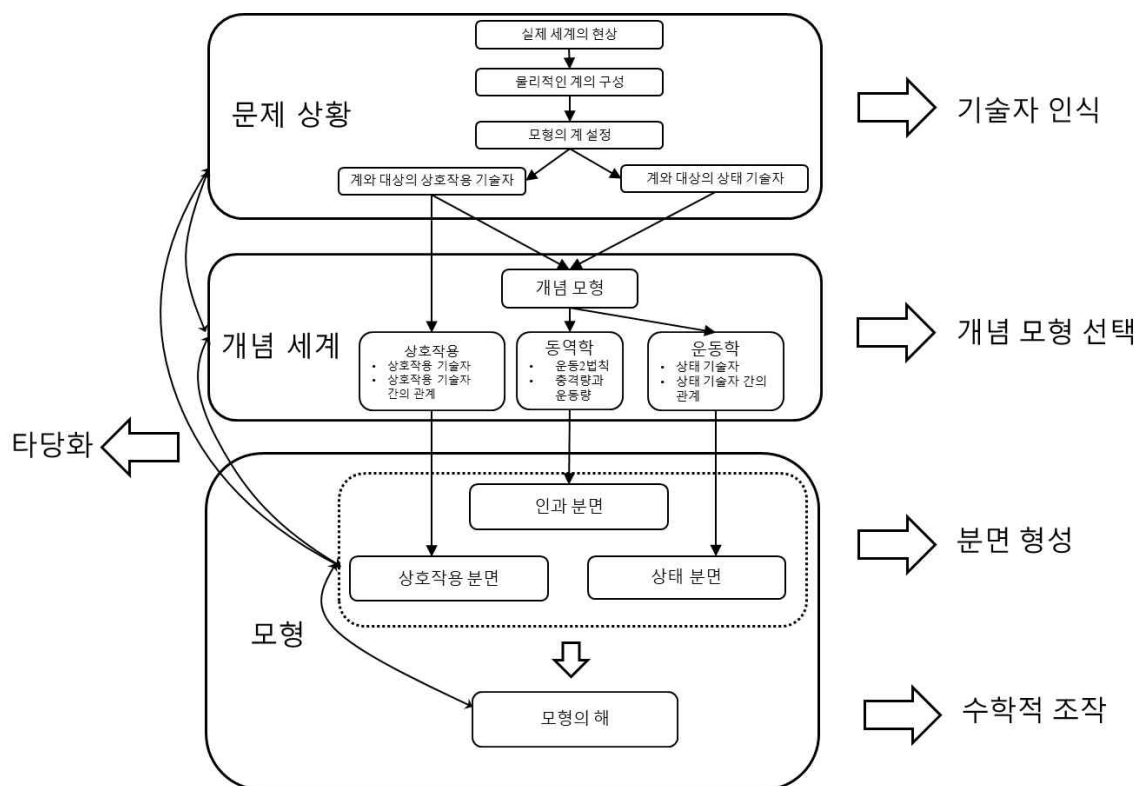
Hestenes (1987)	Lopes & Costa (2007)	Niss (2012)	본 연구
기술 단계	개념화	상황 분석	기술자 식별
x	대면	수학적 모형으로의 변환	개념 모형 선택
형성 단계	조작	수학적 모형으로의 변환	모형 생성
적용 단계	조작	수학적 분석, 결과 분석	수학적 계산
타당화 단계	x	평가	타당화

모형구성의 분석틀의 각 단계와 모형구성 요소와의 관계를 [그림 2-17]에 도식화하였다. 물리 문제는 있는 그대로의 실제 세계를 대상으로 하는 문제와 실제 세계를 이상화하고 단순화한 표준 문제로 나눌 수 있다. 있는 그대로의 실제 세계를 다루는 문제의 경우 실제 세계의 특정 유형과 실체들을 표상한 물리적인 계의 구성이 선행되어야 한다. 이때의 물리적인 계의 구성은 모형의 영역, 즉 패러다임과 이론의 대응 규칙을 준수해야 하며(Halloun, 2006) 문제 상황의 물리적인 계와 대상은 같은 이론을 기반으로 상호 간의 모순이 없어야 한다(Lopes & Costa, 2007). 표준 문제의 경우 문제 상황이 직접적인 물리적인 계의 형태로 제시되기 때문에 위와 같은 과정이 생략된다고 볼 수 있으며 일반적인 고등학생들이 접하는 교과서나 학교 정기고사의 문항들이 이에 해당된다. 문제의 물리적인 계를 구성되거나 제시되면 학습자는 문제에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용을 기술하기 위한 모형의 계를 설정하게 된다. 어떤 대상들을 포함하여 모형의 계를 설정하는가에 따라 생성된 모형이 기술하

[표 2-13] 모형구성 분석틀의 단계

단계	설명
기술자 식별	문제 상황의 물리적 실체들을 대상과 동인으로 구분하여 모형의 계를 구성하고 대상의 상태와 외부와의 상호작용을 기술자(descriptor)로서 인식
	1) 상태 기술자 대상의 행동을 특징짓고 다른 대상이나 동인과의 상호작용을 통해서 변할 수 있는 특성을 표상. 2) 상호작용 기술자 두 개 이상의 물리적 물체들이 서로에게 작용하는 상호작용을 표상.
개념 모형 선택	계의 상태를 기술하고 설명하기 위해 학습자가 사전에 갖고 있던 개념 모형들의 적합성을 판별하고 선택
분면 형성	계의 상태와 상호작용 기술자들을 적절한 개념 세계의 요소들과 연관 지어 모형이 문제 상황의 특정 유형을 대리하는 구조를 구성하는 과정
	1) 상태 분면 대상의 초기 상태나 변화 상태에 대한 규칙성을 기술하거나 정의 2) 상호작용 분면 대상과 대상, 대상과 동인과의 상호작용을 정의 3) 인과 분면 대상이 다른 대상이나 동인과의 상호작용에 의해 상태가 어떻게 변해 가는 지를 인과 관계에 의해 설명
수학적 조작	초기 조건들을 적용하여 문제 상황에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용, 특성과 관련된 해를 수학적으로 도출 모형의 내적 요인과 외적 기준으로 모형의 대응 여부를 판단하는 단계.
타당화	1) 내적 요인 문제 상황과 모형 구조의 동형성, 선택된 개념 모형의 적합성, 분면간의 정합, 수학적 일관성 2) 외적 요인 문제에서 요구하는 해의 정밀함. 해와 제시된 보기와의 일치

고 설명할 수 있는 물리적인 계의 범위가 달라진다. 계의 설정에 따라 계 외부와 계 내부의 상호작용이 구분되며 계에 속한 대상들의 운동이 상태 기술자로서 식별함으로써 기술자 식별이 마무리된다.



[그림 2-17] 모형구성 분석틀의 각 단계와 모형구성 요소와의 관계

학습자의 개념 세계를 [그림 2-6]의 뉴턴 역학 문제해결에 관한 지식 구조를 적용하여 표현하였다. 물리 문제해결에서는 개념 모형이 개념 세계의 중심이 되며 개념 모형을 선택했는가에 따라 동역학과 운동학의 세부 개념들의 관계가 설정된다. 상호작용과 관련된 개념들은 특정 개념 모형과 연관성이 약해 독립적인 측면이 강하다. 예를 들어 힘의 합성은 상호작용 기술자간의 관계에 해당되는 개념이지만 이는 특정한 개념 모형과 관계없이 뉴턴 역학에서 일반적으로 통용된다. 따라서 상호작용과 관련된 개념들은 개념 모형에 의해 그 범위와 관계가 설정되지 않는다고

판단하여 개념 모형과 화살표로 연결하지 않았다.

분면 형성은 계의 운동 상태 변화를 기술하는 상태 분면, 대상에 작용하는 상호작용 간의 관계를 기술하는 상호작용 분면, 상호작용에 의한 대상의 상태변화를 인과적으로 설명하는 인과 분면 등을 통해 모형의 구조를 형성하는 과정이다. 상호작용 분면은 상호작용 관련 개념, 인과 분면은 동역학, 상태 분면은 운동학과 관련된 개념 세계 요소들을 통해 기술자들의 관계가 구체화됨으로써 형성된다.

수학적 조작은 문제 상황의 초기 조건들을 생성된 모형에 적용하여 문제 상황에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용, 특성과 관련된 해를 수학적으로 도출하는 과정이다. 문제에서 요구하는 변인이 무엇인가에 따라 수학적 조작에서 중심적인 역할을 하는 분면이 결정된다.

타당화는 모형의 내적 요인과 외적 기준으로 모형의 대응 여부를 판단하는 단계이다. 내적 요인은 문제 상황의 물리적인 계와 모형 구조의 동형성, 선택된 개념 모형의 적합성, 분면 간의 정합, 수학적 조작의 타당성에 관한 것이다. 외적 요인은 문제에서 요구하는 해의 정밀함, 해와 제시된 보기와의 일치 여부이며 선다형 문항에서는 주로 후자에 해당한다.

2.4. 동료교수와 소집단 상호작용

본 절에서는 동료교수에 대한 개괄적인 설명과 물리 해결에서의 효용성에 대해 논의하였다. 그리고 동료교수를 비롯한 과학 탐구활동에서 소집단 상호작용의 양상에 대한 선행 연구의 결과를 정리하였다. 이를 바탕으로 본 연구의 소집단 상호작용에 대한 접근 방식에 대해 기술하였다.

2.4.1. 동료교수

동료교수(Peer Instruction)는 동료와의 소집단 상호작용을 통해 학생들의 수업 참여와 개념 이해 수준을 높이하고자 한 물리 문제해결과 관련된 대표적인 수업 모형이다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001). 동기 수준이 높은 몇몇의 학생들만 참여하는 일반적인 강의와 달리 동료교수에서는 구조화된 질문을 통해 수업을 듣는 모든 학생들이 적극적으로 협업하며 활동에 관여하도록 한다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001). 동료교수는 1990년대 말부터 대학을 중심으로 물리학 뿐만이 아니라 정보과학, 논리학, 생리학, 화학, 의학 생물학, 수학분야에 널리 적용되었으며 전자 투표기(Clicker) 및 교실응답시스템(CRS: Classroom Reponse System)을 활용하여 교실 안에서 학습자와 교수자간의 즉각적인 피드백이 가능한 수업을 구현하였다(장혜원, 김중복, 2017). 10년 이상의 동료교수는 동료와의 협업을 통해 개인의 학습 성취를 향상시킬 수 있음을 입증한 획기적인 시도로 평가받고 있으며 광범위한 적용을 통해 그 효용성을 검증 받아 왔다(Lasry *et al.*, 2008).

동료교수를 적용한 수업 모듈은 다음과 같이 구성된다. (1)수업 전 읽기 과제(pre-class reading assignments), (2)소강의(mini-lectures), (3)개념검사문항(ConcepTests), (4)동료토론(peer discussion), (5)문제해결

(problem solving), (6)평가(examination)이다(장혜원, 2014). 수업 전 읽기 과제를 제외한 동료교수의 수업 모듈을 [표 2-14]에 제시하였다.

이러한 수업 모듈은 수업 시간 내에 반복될 수 있으며, 다양한 형태의 소집단 상호작용을 적용하여 변형할 수도 있다(Mazur, 1997; Crouch & Mazur, 2001). 동료교수에서 교사는 학생들의 응답을 파악하기 위해 다양한 도구를 사용한다. 개발 초기에는 학생들이 손가락이나 종이카드로 자신의 응답을 알렸으며 최근에는 전자투표기(Clicker)나 웹기반 교실응답시스템인 Learning Catalytics가 개발되면서 학생들의 응답이 실시간으로 확인 가능해졌다(Schell & Mazur, 2013).

[표 2-14] 동료교수의 기본 모듈(장혜원, 2014)

1	2	3	4	5	6
소강의	개념질문	응답1	다른 응답을 한 학생들 간에 짝을 지어 토론	응답2	교사 피드백 설명

2.4.2. 물리 문제해결에서 동료교수의 효용성

동료교수와 관련된 대표적인 연구로 Crouch & Mazur(2001)를 들 수 있다. 이들은 하버드 대학교에서 10년간 동료교수를 적용한 결과 학생들의 Force Concept Inventory와 Mechanics Baseline Test 성취도가 큰 폭으로 상승하였으며, 전통적인 정량적 문제에서도 학생들의 성취가 높아진 것으로 보고하였다(Crouch & Mazur, 2001). 이들은 효과적인 동료교수의 구현 방안도 함께 제시하여 동료교수가 다양한 교과에 적용되는데 핵심적인 역할을 하였다.

Lasry *et al.*(2008)은 최상위 4년제 대학생과 2년제 대학생에게 동료교수를 적용하여 일반 물리학 강좌를 진행한 결과, 배경 지식이 더 많은

학생일수록 더 많은 학습이 일어남을 확인하였다(Lasry *et al.*, 2008). 그러나 배경 지식이 적은 학생들에게는 동료교수가 전통적인 강의식 수업보다 더욱 효과적인 것으로 나타났으며 학생들의 수업 이탈도 적었다(Lasry *et al.*, 2008).

Smith *et al.*(2009)은 동일한 개념에 대한 동형 문항을 쌍으로 제작하여 이전 문항에서의 동료교수가 다음 문항의 풀이에 미치는 영향을 분석하였다. 이들은 모둠원 중에서 정답을 아는 사람이 없을 때에도 동료 토론을 통해 학생들의 이해가 향상되었음을 관찰하고 동료교수가 단순한 정답의 전달이 아님을 주장하였다(Smith *et al.*, 2009).

앞의 선행 연구들이 주로 검사 결과나 성취도에 관한 것이었다면 Mason & Singh(2010)의 연구는 학생들의 절차적 지식 혹은 전략적 지식의 발달에 관한 것이다. Mason & Singh(2010)은 학생들을 연습 시간에 동료 성찰 모둠(Peer reflection group)에 참여하게 하고 문제해결 때 서로에게 전략을 배우게 한 결과를 분석하였다. 동료 성찰에 참여했던 학생들의 기말 고사 성적이 상승한 것은 물론, 다이어그램을 그리는 학생의 비율이 높아진 것으로 보고되었다.

국내에서는 과학영재 교육, 과학교사 연수, 예비 교사 교육 등에 동료교수가 적용된 연구 사례들이 2012년 이후 꾸준히 보고되고 있다. 류은희 외(2012)는 동료교수 수업에서 문항의 난이도에 따른 과학영재의 인지갈등의 특성과 일반 학생들의 인지갈등 정도를 비교 분석하였다. 빛의 직진 및 합성에 관한 동료교수에서 과학영재들은 문항의 난이도와 관계없이 동료토론 후 유의미하게 인지갈등이 감소한 것으로 나타났다. 또한 동료와의 토론 과정에서 과학영재들은 자신의 개념을 명료화하고 반성적 사고를 함으로써 인지갈등을 감소시켰다. 뿐만 아니라 동료 토론 후에 난이도가 높은 문항에 대한 불안이 유의미하게 감소한 것으로 보고되었다(류은희 외, 2012).

김종원 외(2012)는 동료교수에 관한 교사 연수를 통해 초중등 교사들의 과학 개념 변화와 동료교수에 대한 인식을 조사하였다. 개념문항에

대한 사전-사후 검사 결과, 연수에 참여한 교사들은 동료교수 후에 높은 수준의 개념 변화가 있었으며 동료교수를 수업에 활용하는 것에 대한 긍정적인 인식을 가지고 있음이 확인되었다(김종원 외, 2012).

장혜원, 김중복(2017)은 교양물리를 수강하는 예비교사들을 대상으로 동료교수를 실시한 후 동료교수에 대한 경험과 인식을 분석하였다. 연구 결과 예비교사들은 동료교수에서 사고중심과 소통기반 수업이 왜 중요한지를 인식하고 소통기반 수업이 다양한 생각의 가치를 이해하는데 기여할 것이라고 응답하였다(장혜원, 김중복, 2017).

이러한 국내 연구의 성과에도 불구하고 물리 문제해결이 학습에서 큰 비중을 차지하는 일반 고등학생들을 대상으로 한 동료교수 연구는 부족한 상황이다. 또한 대부분 연구가 개념 검사 문항에 대한 결과이므로 고등학생들이 흔히 접하는 정량적인 물리 문제해결에 동료교수가 어떤 영향을 미치는가에 대해서 실증적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

2.4.3. 소집단 상호작용의 양상

James & Willoughby(2011)은 동료교수에서 일어나는 학생들의 담화를 분석하여 학생들의 담화가 교수자가 생각하는 기준에 얼마나 부합되며 실제로 어떤 양상의 대화를 나누는지 분석하였다. James & Willoughby(2011)는 동료교수에서 모둠원 중 적어도 한 명은 다른 대안을 제시하고 모듬이 만족할만한 설명을 구성할 때까지 논의하는 경우를 표준 대화(standard conversations)로 규정하였다. 총 361개의 담화 중에서 136개만이 표준 대화였으며 225개의 비표준 대화는 [표 2-15]와 같이 분류되었다.

James & Willoughby(2011)의 연구 결과는 기존의 양적 연구들과 달리 동료 토론에서 학생들의 대화를 분석했다는 점에서 색다른 의미를 부여할 수 있다. 특히 학생들이 교사가 예상하지 못한 지식의 근원을 이용

하여 문제를 해결하거나 정답을 선택하는 과정에 비논리적인 요인이 작용하고 있음을 지적한 부분은 동료교수의 효용성 뿐만이 아니라 비판적인 관점에서의 접근이 필요함을 시사한다. 그러나 대화의 분석 단위가 다소 모호하고 표준 대화에서의 학생들의 상호작용을 명확하게 정의하지 않고 이를 세밀하게 분석하지 않은 점은 아쉬움으로 남는다.

[표 2-15] 동료교수에서 비표준 대화(James & Willoughby, 2011)

범주	세부 항목
예상치 못한 학생들의 생각	직접적인 내용 지식에 대한 예상치 못한 학생들의 생각
	근접한 내용 지식에 대한 예상치 못한 학생들의 생각
	기초적인 과학 내용 지식에 대한 예상치 못한 학생들의 생각
	지난 강의에서 배운 관계없는 내용을 연관시킴
학생들의 이해를 왜곡한 통계적인 피드백	관계없는 단서를 사용하여 응답
	대화에서 설명한 본인의 정답과 동료의 정답이 일치하지 않을 때 동료의 정답을 선호함
대화가 곤란한 경우	정답을 선택하는 과정에서 물리적인 근거를 제시하지 않음
	동료가 명백한 답을 제시하여 조기에 대화가 종료됨
	다른 학생들의 설명에 수동적으로 대응
	대화의 시작이 불가능

Wood *et al.*(2014)는 동료교수를 적용한 대학생들의 일반물리학 수업에서의 담화를 자원 모형(resource model)으로 분석하였다. 동료와의 토의 과정에서 활성화되는 자원은 명제적 지식과 절차적 지식에 관한 지식 요소(knowledge elements), 요소들을 적용하는 유형의 연결에 관한 지식 구조(knowledge structures), 지식 구조를 언제 활성화시킬 것인가에 관한 통제 구조(control structure)로 범주화된다(Wood *et al.*, 2014). Wood

et al.(2014)는 학생들의 담화를 분석하여 세 종류의 자원이 활성화되는 사례를 제시하고 동료교수에서의 토의가 지식의 파편이나 정답의 전달을 넘어 지식을 적용하는 방법과 이론에 관한 학생들의 인식에도 영향을 줄 수 있음을 주장하였다.

Wood *et al.*(2014)의 연구 결과는 동료교수 맥락에서 학생들의 소집단 상호작용이 지식의 교환에서부터 개념의 활용과 이론에 대한 이해에 관한 내용적인 측면의 발달을 체계적으로 분석했다는 점에서 의의가 있다. 또한 정답률만으로 분석할 수 없는 학생들의 인지적인 학습 과정에 관한 분석을 시도했다는 점에서 물리 문제해결에 관한 의미 있는 시사점을 제공한다. 그러나 세 모둠의 담화만을 분석하였으므로 Wood *et al.*(2014)의 주장은 동료교수의 효용성에 대한 일반적인 결론이라기보다는 소집단 상호작용을 활용한 교수-학습의 분석 범위를 확장시켰다는 것으로 제한된 의의를 부여할 수 있다.

Hogan *et al.*(1999)은 교사에 의해 안내된(teacher-guided) 소집단 논의 과정에서 학생들이 수행한 추론의 복잡성과 상호작용의 유형을 연관지어 분석하였다. Hogan *et al.*(1999)은 상호작용의 유형을 구성원들의 역할과 참여방식에 따라 일방적 상호작용, 쌍방적 상호작용, 정교화 상호작용의 세 가지로 나뉘었으며, 유형별 정의는 [표 2-16]에서 제시하였다. 교사에 의해 안내된 토의에서 일방적 상호작용은 8%, 쌍방적 상호작용 54%, 정교화 상호작용 34%, 지식구성과 무관한 상호작용이 4%의 비율로 나타났다(Hogan *et al.*, 1999). 동료 토의에서는 일방적 상호작용이 19%, 쌍방적 상호작용 23% 정교화 상호작용은 48%, 지식구성과 무관한 상호작용이 10%로 나타나 교사가 개입했을 때 일방적 상호작용의 비율은 감소하고 쌍방적 상호작용의 비율은 높아지는 것으로 나타났으며, 정교화 상호작용의 경우는 오히려 학생들만 토의할 때 증가하였다(Hogan *et al.*, 1999).

Hogan *et al.*(1999)의 소집단 상호작용에서 학생들의 역할과 발언에 따라 상호작용의 양상이 어떻게 달라지는지를 명확하게 보여주는 사례이

므로 본 연구의 소집단 상호작용의 대략적인 양상을 기술하는데 있어 참고할만한 요소가 있다고 판단된다.

[표 2-16] 담화 유형 분류틀(Hogan *et al*, 1999)

유형	도식	설명
일방적 상호작용 (Consensual)		한 사람이 인지적(conceptual), 지각적(perceptual), 연계적(connecting), 전략적(strategic) 발언 등 의미 있는 발언을 하고 다른 사람들은 단순한 긍정이나 중립적인 반응을 보이는 것이다.
쌍방적 상호작용 (Responsive)		적어도 두 사람이 각각 의미 있는 질문과 반응을 통해 토의에 참여하는 경우이다. 질문하는 사람과 대답하는 사람의 역할은 다르나 토의에 동등하게 기여한다.
정교화 상호작용 (Elaborative)		모든 참여자가 다양한 방식으로 토의에서 중요한 역할을 하는 경우이다. 일순의 호응(responsive)과의 차이는 여러 번에 걸쳐서 대화가 오고가며, 참여자가 다양한 방식으로 기여한다는 점이다. 즉, 공동 구성을 위한 추가(co-constructive additions), 정정(corrections), 변증법적인 교환(dialectical exchange) 등을 통하여 기여할 수 있다.

이신영 외(2012)는 비록 혈액의 순환을 대상으로 한 연구이지만 소집단 모델링 수업에서 모두의 상호작용과 모형의 발달을 연구했다는 점에서 논의할만한 가치가 있다. 소집단 상호작용에 따른 심장 내 혈액 흐름에 대한 모델 발달 유형을 분석한 결과 소집단 상호작용은 학생들이 공동 모델을 구성하는 데에 중요한 요인이며, 모형의 비판적 검토, 모형의 제시자, 리더의 유형이 상호작용에 영향을 미친 것으로 보고되었다(이신

영 외, 2012). 모형의 발달 유형을 정체형, 첨가형, 정교형으로 분류하였다. [표 2-17]에서 이신영 외(2012)의 연구에서 보고한 소집단 모형 발달 유형과 상호작용 특성을 제시하였다

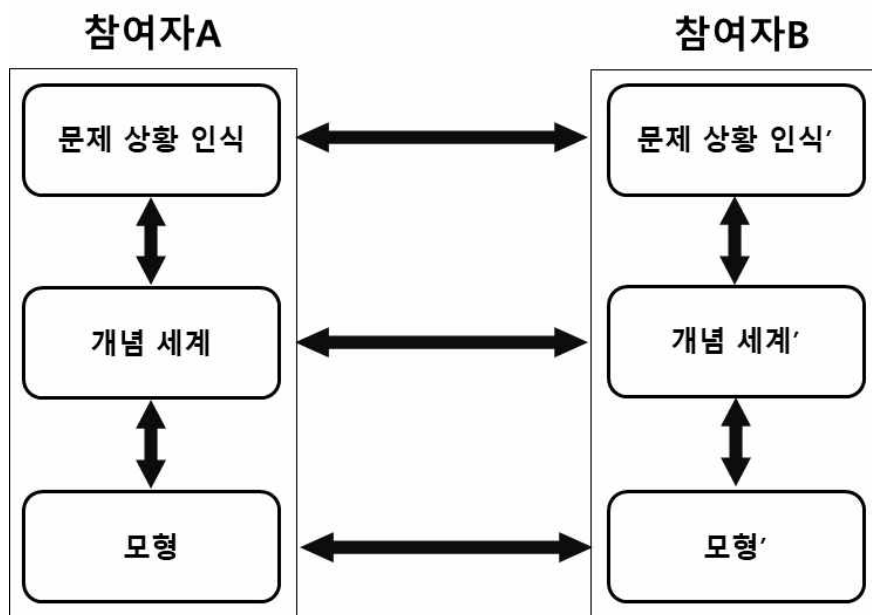
[표 2-17] 소집단 모형발달 유형과 상호작용 특성(이신영 외, 2012)

소집단 모형발달 유형		상호작용 특성		
		비판적 검토	모형 제시자	리더 유형
정체형				
한 학생의 모형	→ 소집단 모형	나타나지 않음	리더만 참여	배타적
첨가형				
한 학생의 모형	↘ 단순한 합	다른 소집단 구성원에 의해 나타남	리더 외의 학생들도 참여	선택적
다른 사람의 모형	→ 소집단 모형			
정교형				
한 학생의 모형	↘ 새로운 융합	모형 제시자나 다른 소집단 구성원에 의해 나타남		선택적 혹은 포용적
다른 학생의 모형	→ 소집단 모형			

이신영 외(2012)의 연구는 학생들이 개별적으로 구성한 모형을 기반으로 집단의 모형을 구성하는 과정을 분석했다는 점에서 본 연구의 맥락과 유사하다. 특히, 모듈원의 비판적 검토와 모형 제시자의 존재 등은 물리 문제해결에 관한 소집단 상호작용에서도 중요한 요인으로 작용할 개연성이 크다. 단, 학생들의 개별적인 모형을 평가하지 않고 수평적으로 분류한 점과 소집단 모형이 개인에게 적절히 내면화되었는지에 대한 분석이 이뤄지지 않은 점은 비판의 소지가 있다.

지금부터는 모형구성 요소와 소집단 상호작용의 선행 연구의 결과에 적용하여 본 연구에서의 소집단 상호작용에 논하고자 한다. 이신영 외(2012)에서는 소집단 상호작용을 통한 모형의 발달 측면을 강조하였으나 Wood *et al.*(2014)의 결과를 보면 물리 문제해결에 관한 동료와의 토론

에서 학생들은 모형이나 모형의 해에 대해서만 논의하지 않음을 알 수 있다. 즉, 학생들은 문제해결에 관한 각자의 모형을 비교하거나 수용하는 과정에서 모형을 구성하는 지식 요소나 개념 모형과 같이 개념 세계에 해당되는 영역과 문제에 대한 이해 등에 관해 논의한다(Wood *et al.*, 2014, 박윤배, 김미영, 2006). 따라서 본 연구에서 모형구성의 소집단 상호작용을 모형구성의 세 가지 요소, 즉 문제 상황, 개념 세계 및 모형에 관한 논의로 세분화하였다[그림 2-18]. [그림 2-18]에서 수평방향 화살표는 모형구성 요소들의 상호작용을 의미하며 큰 사각형 내부에서 모형구성 요소들을 연결하는 수직방향 화살표는 모형구성 요소들의 내적 일관성을 의미한다.



[그림 2-18] 모형구성 요소의 상호작용

먼저 문제 상황 인식의 상호작용은 참여자들이 주어진 정보를 바탕으로 문제 상황을 어떻게 재구성했는가를 비교하는 것이다. 문제 상황 인식의 논의는 제시문의 구문과 도식의 표상에 대한 이해뿐만이 아니라 계의 설정과 기술자 식별에 관한 내용을 포함한다.

개념 세계 간의 상호작용은 개념 세계를 구성하는 이론과 개념 모형,

개념에 대한 논의로 이해할 수 있다. 학생들의 모형과 문제 상황 인식에 대한 논의는 활동지를 통해 외부에서 관찰 가능한 영역이지만 모형구성 과정에서 활용된 개념 세계 요소들의 특성은 자발적으로 외부에 드러나지 않을 수 있다(Lopes & Costa, 2007). 그러나 문제해결에 관한 담화에서 학생들은 자신이 어떠한 인지적 자원을 활용했는가를 언급하면서 개념 세계의 일부를 노출하며(Wood *et al.*, 2014) 이를 통해 동료교수에서 개념 세계의 상호작용을 관찰할 수 있다.

모형에 대한 논의는 참여자들이 각자 구성한 모형을 동료들과 공유하는 과정에서 모형의 각 분면과 수학적 조작에 의한 해를 비교/평가하는 것을 의미한다. 이는 모형구성에 관한 소집단 상호작용의 전체적인 방향을 결정짓는 핵심적인 영역으로 모형 구조의 공통점과 차이를 식별하여 모형의 타당성을 검증하고 모형의 수용, 수정, 융합 등을 통해 모형의 공동 구성이 일어난다(이신영 외, 2012).

3. 연구 방법

3.1. 연구 대상

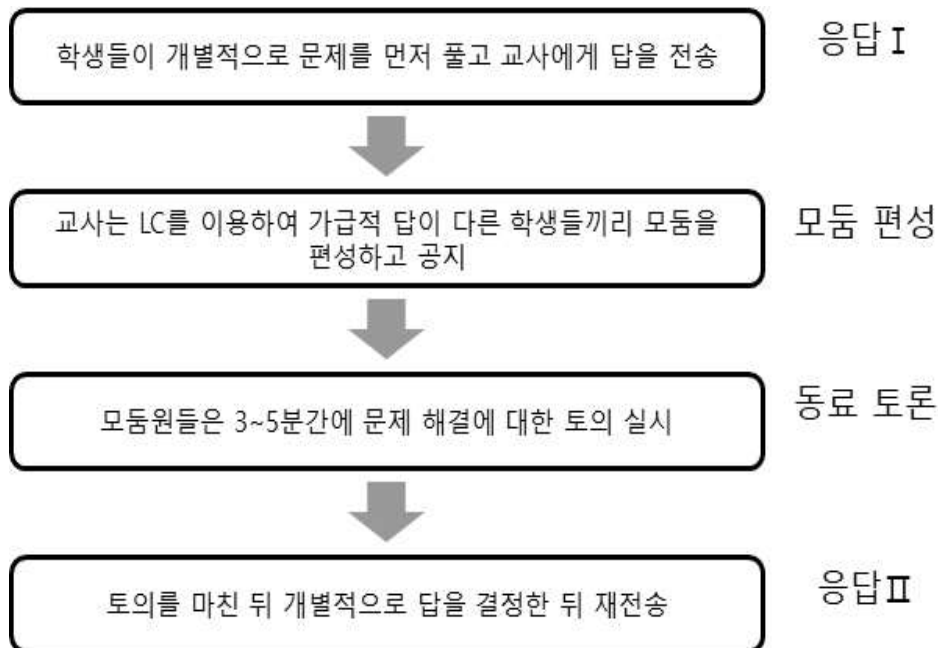
본 연구는 서울에 소재한 일반계 고등학교 2학년 남학생들을 대상으로 진행되었다. 연구자는 학교장의 동의를 얻어 연구 목적으로 특강이 개설됨을 공지하고 연구 참여자를 모집하였다. 총 32명의 참여자들이 모집공고를 보고 자원했으며 물리 성적이 우수한 학생들이 다수를 차지하였다. 또한 연구 참여자들은 자연계열 학생들로 직전 1학기에 뉴턴의 운동 법칙에 대한 학습한 경험이 있었다. 수업은 2017년 9월에 진행되었으며 90분씩 2차시를 진행하였다. 2차시 수업 중에서 1차시에서는 18번 학생이, 2차시에서는 3번 학생이 개인 사정으로 불참하였다.

3.2. 수업의 구성

3.2.1 수업의 흐름

동료교수를 적용한 수업을 진행하기 위해 본 연구에서는 최근에 개발된 Learning Catalytics를 활용하였다. Learning Catalytics는 Mazur가 이끄는 하버드 대학의 물리교육 연구진에서 일반 물리를 수강하는 학생들의 수업참여를 높이고 상호작용을 촉진을 목적으로 개발한 것으로 자신들이 설계한 동료교수를 구현하기 위해 설계된 교실응답시스템(Classroom Response Systems)의 일종이다(Schell & Mazur, 2013). Learning Catalytics는 기존의 Clicker가 별도의 단말기를 필요로 했던 것과 달리 학생들은 자신의 스마트폰과 태블릿 PC의 웹 브라우저를 통해 Learning Catalytics에 접속할 수 있다.

Learning Catalytics를 활용한 동료교수 활동에서 참여자들은 같은 문항을 2번에 걸쳐 풀게 되는데, 첫 번째 시도에서는 동료 참여자와의 어떠한 상호작용도 없이 개별적으로 선다형 문제를 푼 뒤에 Learning Catalytics를 통해 자신의 답을 교사에게 전송한다(Schell & Mazur, 2013). 전송이 완료되면 교사는 Learning Catalytics의 모둠 편성 기능을 활용하여 가급적 답이 다른 참여자들끼리 한 모둠이 되도록 편성한 뒤 모둠 결과를 공지한다(Schell & Mazur, 2013). 참여자들은 모둠별로 모여 문항에 대한 각자의 풀이와 답에 대해 토론한 후, 자신의 원래 자리로 돌아와 개별적으로 교사에게 답을 전송하게 된다. 본 연구에서 원칙적으로 4명이 한 모둠원으로 구성되며, 학생들이 제출한 답에 따라 매 문항 모듬의 편성이 변하게 된다. 수업은 연구자와 정규 물리수업을 담당하고 있는 교사가 함께 진행하였으며, 전체적인 수업의 흐름은 [그림 3-1]에 제시하였다.



[그림 3-1] 수업의 흐름

3.2.2. 문항의 제작

문항을 제작하는데 있어 가장 고려한 것은 학생들이 물리 I 교과 내에서 흔히 접할 수 있는 상황이어야 한다는 점이다. 이를 위해 물리 I 정규 수업의 형성 평가 등에서 많이 활용되는 문제 상황을 적용하고자 하였다. 정답률이 중간 수준이거나 높은 문항의 경우 학생들이 답을 단순히 받아들이는 경우가 많으며, 정답률이 낮은 경우 학생들의 협업이 촉진된다는 선행연구(Smith *et al.*, 2009; Jang *et al.*, 2017)를 참고하여 중간 혹은 다소 높은 난이도로 설정하고자 하였다. 마지막으로 학생들의 모형 구조를 세부적으로 분석하기 위해서 모형의 각 분면을 모두 구성해야만 문제해결이 가능한 형태로 문항을 개발하고자 하였다. 즉, 모형의 분면이 명확하게 구별되고 수학적 모형구성이 가능한 문제 상황을 제시하기 위해 물리 I 교육과정의 핵심 아이디어 중에서 뉴턴의 운동법칙을

선택하였다. 또한 정답이 다른 학생들끼리 모두 편성을 용이하게 하기 위해 모두 5지 선다형으로 제작되었다. 대학수학능력시험과 전국연합모의고사에서 다수의 출제 경험이 있는 경력이 15년 이상의 물리교사 1인과 물리교육전문가 1인과의 협업을 통해 총 12개의 문항을 개발하였다.

대부분의 문항은 연구자가 자체적으로 개발하였으나 1번과 9번은 Force Concept Inventory(Hestenes *et al.*, 1992)의 문제 상황을 차용하였다. 개발된 문항은 물리교육 전문가와 중등 물리 교사 및 대학원생들로 구성된 집단 세미나를 통해 타당도를 검토 받았다. 각 문항의 문제 상황과 평가 요소를 [표 3-1]에 제시하였다.

[표 3-1] 문제 상황과 평가 요소

번호	문제 상황	평가 요소
1	등가속도 운동 (자유낙하)	○ 자유 낙하하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다.
2	등가속도 운동 (자유낙하), 등속직선 운동	○ 자유 낙하하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다. ○ 등속으로 낙하하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다. ○ 다른 유형의 운동을 하는 두 물체의 운동을 동일한 좌표계에서 기술할 수 있다.
3	등속직선 운동, 등가속도 운동	○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다. ○ 등가속도 운동하는 물체의 이동거리를 속도의 함수로 표현할 수 있다. ○ 등속 직선 운동하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다.
4	등가속도 운동	○ 속도-시간 그래프의 기울기를 이용하여 가속도를 계산할 수 있다. ○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다. ○ 속도-시간 그래프의 기울기를 이용하여 가속도를 계

		<p>산할 수 있다.</p> <p>○ 등가속도 운동하는 물체의 이동거리를 속도의 함수로 표현할 수 있다.</p>
5	등가속도 운동	<p>○ 등속 직선 운동하는 물체는 힘이 작용하지 않는 것이 아니라 알짜힘의 크기가 0임을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 운동하고 있는 물체에는 일정한 크기의 마찰력이 작용하고 있음을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다.</p> <p>○ 등가속도 운동하는 물체의 속도를 시간의 함수로 표현할 수 있다.</p>
6	등가속도 운동	<p>○ 등속 직선 운동하는 물체는 힘이 작용하지 않는 것이 아니라 알짜힘의 크기가 0임을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 운동하고 있는 물체에는 일정한 크기의 마찰력이 작용하고 있음을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 힘의 합성을 이용하여 물체에 작용하는 알짜힘의 크기를 계산할 수 있다.</p> <p>○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다.</p> <p>○ 등가속도 운동하는 물체의 이동거리를 속도의 함수로 표현할 수 있다.</p>
7	등가속도 운동	<p>○ 팽팽한 실로 연결된 물체에 장력이 작용하고 있음을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 물체에 작용하는 힘의 종류와 방향을 식별할 수 있다.</p> <p>○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 가속도로 운동하고 있는 물체의 알짜힘의 크기를 구할 수 있다.</p> <p>○ 두 물체의 운동방정식을 연립하여 물체에 작용하는 힘의 크기를 구할 수 있다.</p>
8	등가속도 운동	<p>○ 팽팽한 실로 연결된 물체에 장력이 작용하고 있음을 이해할 수 있다.</p> <p>○ 물체에 작용하는 힘의 종류와 방향을 식별할 수 있다.</p> <p>○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 가속도로 운동하고 있는 물체의 알짜힘의 크기를 구할 수 있다.</p> <p>○ 두 물체의 운동방정식을 연립하여 물체에 작용하는 힘의 크기를 구할 수 있다.</p> <p>○ 등가속도 운동하는 물체의 속도를 시간의 함수로 표</p>

		현할 수 있다.
9	등가속도 운동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 가속도로 운동하고 있는 물체의 알짜힘의 크기를 구할 수 있다. ○ 운동 3법칙을 적용하여 작용과 반작용 관계에 있는 힘을 구할 수 있다.
10	등가속도 운동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 운동 3법칙을 적용하여 작용과 반작용 관계에 있는 힘을 구할 수 있다. ○ 운동 2법칙을 적용하여 일정한 크기의 알짜힘이 작용하는 물체를 가속도를 구할 수 있다. ○ 등가속도 운동하는 물체의 이동거리를 시간의 함수로 표현할 수 있다. ○ 서로 다른 운동을 하는 물체의 운동을 동일한 좌표계에서 기술할 수 있다.
11	가속도 운동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 힘-시간 그래프에서 면적을 계산하여 물체에 작용한 충격량을 구할 수 있다. ○ 물체에 작용한 충격량의 크기는 운동량의 변화량과 같다는 것을 적용하여 물체의 속도 변화량을 구할 수 있다.
12	가속도 운동	<ul style="list-style-type: none"> ○ 힘-시간 그래프에서 면적을 계산하여 물체에 작용한 충격량을 구할 수 있다. ○ 물체에 작용한 충격량의 크기는 운동량의 변화량과 같다는 것을 적용하여 물체의 속도 변화량을 구할 수 있다. ○ 등가속도 운동하는 물체의 속도를 시간의 함수로 표현할 수 있다.

이번에는 [그림 2-6]에서 제시한 뉴턴 역학의 지식 구조를 이용하여 각 문항이 뉴턴 역학의 어떤 지식 구조를 반영하고 있는지를 [표 3-2]에 제시하였다.

[표 3-2] 뉴턴 역학의 지식 구조에 따른 문항 분석(*는 명시적으로 제시되지 않는 상호작용임)

문항	일반적인 규칙	동역학	운동학		상호작용	
			운동기술자	기본 모형	상호작용 기술자	상호작용 기술자간의 관계
1	x	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등가속도 운동	중력	x
2	대상들의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다.	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등가속도 운동 등속직선 운동	중력, 공기와의 마찰력*	$F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
3	x	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등속직선 운동 등가속도 운동	지면과의 마찰력	x
4	x	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등가속도 운동	지면과의 마찰력	x
5	x	$F=ma$	속도, 가속도	등속직선 운동 등가속도 운동	외력, 지면과의 운동마찰력*	$F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
6	x	$F=ma$	변위, 속도, 가속도	등속직선 운동 등가속도 운동	외력, 지면과의 운동마찰력*	$F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
7	대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미	$F=ma$	가속도	등가속도 운동	중력, 대상 간 상호작용(장력)*	$F_{12} = -F_{21},$ $F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$

		친다.					
8		대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다.	$F = ma$	속도, 가속도	등가속도 운동	중력, 마찰력, 대상간 상호작용(장력)*	$F_{12} = -F_{21},$ $F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
9		대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다.	$F = ma$	가속도	등가속도 운동	대상간 상호작용, 자동차의 구동력*	$F_{12} = -F_{21},$ $F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$
10		대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다. 대상들의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다.	$F = ma$	변위, 속도, 가속도	등가속도 운동	대상간 상호작용(장력)	$F_{12} = -F_{21}$
11	x		$F\Delta t = \Delta mv$	속도, 운동량	충격에 의한 운동	짧은 시간 동안 가해지는 충격량	x
12	x		$F\Delta t = \Delta mv$ $F = ma$	속도, 가속도, 운동량	등가속도 운동 충격에 의한 운동	제동력, 중력	x

본 연구에서 개발한 문항으로부터 확인하고자 하는 계의 구성에 관한 일반 규칙은 다음과 같다.

- 1) 대상들의 상대적인 운동은 전체 계의 병진 운동에 영향을 주지 않는다.
- 2) 대상들 간의 상호작용은 계의 가속도에 영향을 주지 않으며 계 외부의 동인에 의한 상호작용이 계의 가속도에 영향을 미친다.

본 연구에서는 뉴턴 역학의 일반적인 규칙 중에서 계의 운동에 관한 부분을 반영하여 문항을 제작하였다. 계의 구성과 특성에 관한 부분을 반영하지 않은 이유는 고등학교 물리 문제는 실제 자연현상을 부분적으로 묘사하는 물리적인 계(physical system)의 형태로 제시되기 때문이다. 계의 구성과 특성은 실제 세계 혹은 자연적인 계(natural system)를 물리적인 계로 개념화하고 단순화하는 과정(Hestenes, 1997; Lopes & Costa, 2007; Niss, 2012)에서 요구된다. 순수하게 자연적인 계에 관한 문제 상황은 고등학교 현장에서 학생들이 흔히 접하는 유형이 아니므로 본 연구에서는 계의 구성과 특성에 관한 부분을 문항 제작에 반영하기 어려웠다.

개념 모형으로는 등속직선 운동, 등가속도 직선 운동, 충격에 의한 운동을 선정하였으며 동역학에서는 물리 I 교육과정을 고려하여 뉴턴의 운동2법칙을 개념 모형에 따라 $F=ma$ 와 $F\Delta t = \Delta mv$ 로 구별하였다. 운동학 측면에서는 변위, 위치, 속도, 가속도, 운동량을 상태 기술자로, 상호작용 측면에서는 중학교 과학과 물리 I 교육과정에서 제시한 중력, 마찰력, 충격력을 상호작용 기술자로 제시하였다. 일부 문항에서 대상 간의 상호작용을 표현하기 위하여 장력을 포함시켰으나 이를 명시적으로 언급하지는 않았다. 상호작용 기술자의 관계는 교육과정에서 운동3법칙으로 제시하고 있는 $F_{12} = -F_{21}$ 와 중학교에서 다루는 힘의 합성($F_k = \sum_{j=1}^k F_{kj}$)으로 한정하여 문항을 제작하였다.

1번부터 6번까지는 1차시 수업에서 활용되었으며 7번부터 12번은 2차시 수업에서 활용되었다.

3.2.3. 문항 정답률

응답 I 과 응답 II에서의 학생들의 정답률을 [표 3-3]에 제시하였다. 검사 문항에 대한 채점은 Learning Catalytics에 전송된 학생들의 응답을 대상으로 실시되었다. 학생들은 교사가 마감할 때까지 자유롭게 선택한 답을 변경할 수 있었다.

[표 3-3] 문항 정답률

문항	정답률(%)	
	응답 I	응답 II
1	67.7	90.3
2	64.5	93.5
3	71.0	100.0
4	54.8	100.0
5	80.6	96.8
6	35.5	96.8
7	32.3	61.3
8	64.5	100.0
9	32.3	45.2
10	22.6	58.1
11	74.2	96.8
12	45.2	77.4
전체	53.8	84.7

Cangelosi(1990)의 기준으로 각 문항에 대한 난이도를 해석을 할 수 있다. Cangelosi(1990)에 따르면 난이도에 대한 해석은 정답률이 25% 미만이면 ‘어려운 문항’으로, 25%이상 75% 미만이면 ‘적절한 문항’으로, 75% 이상이면 ‘쉬운 문항’으로 판단한다. 응답 I 의 정답률을 위 기준에 적용해보면 쉬운 문항인 5번과 어려운 문항인 10번을 제외하고는 모두 적절한 문항으로 분류할 수 있다.

학생들은 대체적으로 동료와의 토론을 거친 뒤에 응답Ⅱ에서 높은 비율로 정답을 식별하고 선택하는 것으로 나타났다. 그러나 7번, 9번, 10번은 응답Ⅱ에서도 70% 이하의 정답률을 보이고 있다. 세 문항의 저조한 정답률은 동료와의 토의에도 불구하고 정답을 찾지 못할 만큼 난이도가 높았거나 오답을 정답으로 오인할만한 요인이 있었던 것으로 생각된다.

3.2.4 모듈의 정답 분포 변화

본 연구에서는 응답 I 에서 학생들이 선택한 답을 기초로 가급적 답이 다른 학생들끼리 모듈을 편성을 하고자 하였다. 따라서 매 문항마다 학생들은 다른 모듈에서 동료교수를 진행하였다. 동료교수를 거치며 각 모듈별로 정답을 선택한 모듈원의 수가 어떻게 변했는지를 [표 3-4]에서 제시하였다.

[표 3-4] 모듬의 정답 분포 변화

응답 I	응답 II	※모듬(N=95)
All correct answers	All correct answers	16, 17, 22, 26, 27, 31, 42, 43, 48, 52, 54, 56, 57, 58, 84, 87, 88, 113, 115, 116, 117, 123
	3 correct answers	
	2 correct answers	
	1 correct answer	
	No correct answer	
3 correct answers	All correct answers	12, 35, 51, 86, 98, 118, 128
	3 correct answers	
	2 correct answers	
	1 correct answer	
	No correct answer	
2 correct answers	All correct answers	11, 13, 14, 21, 24, 25, 36, 37, 38, 64, 67, 68, 77, 78, 83, 112, 127
	3 correct answers	15
	2 correct answers	
	1 correct answer	18, 53
	No correct answer	71
1 correct answer	All correct answers	32, 33, 34, 41, 44, 45, 46, 47, 62, 63, 65, 66, 72, 73, 74, 81, 82, 85, 91, 97, 101, 106, 111, 124, 126
	3 correct answers	55, 61, 104, 105, 108, 125
	2 correct answers	23, 94, 114, 121
	1 correct answer	93, 103, 122
	No correct answer	76, 92, 95, 96, 107
No correct answer	All correct answers	
	3 correct answers	
	2 correct answers	
	1 correct answer	
	No correct answer	75, 102

※ 모듬의 숫자는 앞자리는 문항 번호, 뒷자리는 모듬 번호의 조합을 의미한다. 예를 들어 27은 2번 문항의 7조를 의미한다.

※ 원칙적으로 문항별 8개 모듬이 구성되어야 하나 2번 문항만 예외적으로 7개 모듬으로 구성되었다.

총 95개의 모듈 중에서 응답 I 에서 모든 모듈원이 정답을 선택한 모듈은 19개이며 응답 II 에서 모든 모듈원이 정답을 선택한 모듈은 71개이다. 응답 I 에서 정답을 선택한 모듈원이 1명인 모듈은 응답 II 에서 한 개의 답으로 합의하기보다는 개별적으로 답을 판단하고 선택하는 경우가 상대적으로 높은 빈도로 나타났다.

3.3 자료 수집

본 연구에서는 학생들이 동료교수 활동에서 동료들과 나눈 담화와 작성한 활동지를 분석 대상으로 선정하였다. 학생들이 모둠별로 모여서 토론을 하는 장면은 캠코더를 이용하여 녹화되었으며 대화 내용은 모두 전사되었다. 문항에 대한 학생들의 응답은 교실응답시스템에 의해 자동으로 수집되었다.

연구자는 수업에서 학생들의 활동을 관찰한 내용을 정리하여 관찰 기록을 작성했다. 작성된 관찰 기록은 학생 활동지, 전사 자료 등과 더불어 학생들의 동료교수 활동을 해석하기 위한 기초 자료로 활용되었다. 이와 같이 본 연구에서는 질적 연구로서의 타당성을 확보하기 위해 단 하나의 출처로부터 자료를 수집하기보다는 다양한 방법으로 자료를 수집하는 삼각검증법을 사용하였다(곽영순, 2003; 채동현, 2003).

3.4 자료 분석

3.4.1. 모형구성의 분석틀

연구자는 학생들이 작성한 활동지와 전사 자료를 바탕으로 학생들의 문제해결과정과 결과를 반복적으로 분석하였다. 연구자가 학생들의 모형구성을 분석한 결과와 모형구성에 관한 선행 연구를 비교한 뒤 Hestenes(1987)과 Lopes & Costa(2007), Niss(2012)의 관점을 토대로 본 연구의 모형구성의 분석틀을 제안하였다[표 2-13].

참여자들의 모형구성 유형은 학생들이 작성한 활동지를 토대로 분석하였으며 활동지만으로 식별이 어려운 경우 전사 자료를 참고하였다.

3.4.2. 소집단 상호작용 양상 분류

연구자는 참여자들의 소집단 상호작용 양상을 대응된 모형을 구성한 모둠원의 수, 모둠원들의 역할, 모형의 동질성, 모형의 변화 측면에서 분류하고자 하였다. 모형의 대응이란 참여자 자신이 구성한 모형이 문제 상황에 대해 타당한 설명력을 지녔다고 판단한 경우를 의미한다.

먼저 모둠 내에 대응된 모형을 구성한 모둠원 수는 참여자들이 작성한 활동지와 전사 자료를 통해 분석이 이뤄졌다. 참여자들은 다양한 방식으로 자신이 구성한 모형의 타당성을 검증하는데, 명시적으로 드러난 타당화의 기준은 모형의 해가 문제의 보기와 일치하느냐이다. 참여자들은 자신의 해가 보기 중의 하나와 일치하면 모형이 타당하다고 인식하는 경우가 많았다. 반면 해가 보기 중의 하나와 일치하지 않거나 모형구성 과정에서 임의적인 요소가 개입된 경우 모형이 대응되지 않았다고 판단하는 것으로 관찰되었다. 이는 참여자들이 응답 I에서 제출한 답안과 활동지, 전사 자료를 통해 모둠 내에 모형의 대응에 대한 참여자들의 판단을 유

[표 2-13] 모형구성 분석틀의 세부 단계

단계	설명
기술자 식별	문제 상황의 물리적 실체들을 대상과 동인으로 구분하여 모형의 계를 구성하고 대상의 상태와 외부와의 상호작용을 기술자(descriptor)로서 인식
	1) 상태 기술자 대상의 행동을 특징짓고 다른 대상이나 동인과의 상호작용을 통해서 변할 수 있는 특성을 표상. 2) 상호작용 기술자 두 개 이상의 물리적 물체들이 서로에게 작용하는 상호작용을 표상.
개념 모형 선택	계의 상태를 기술하고 설명하기 위해 학습자가 사전에 갖고 있던 개념 모형들의 적합성을 판별하고 선택
분면 형성	계의 상태와 상호작용 기술자들을 적절한 개념 세계의 요소들과 연관 지어 모형이 문제 상황의 특정 유형을 대리하는 구조를 구성하는 과정
	1) 상태 분면 대상의 초기 상태나 변화 상태에 대한 규칙성을 기술하거나 정의 2) 상호작용 분면 대상과 대상, 대상과 동인과의 상호작용을 정의 3) 인과 분면 대상이 다른 대상이나 동인과의 상호작용에 의해 상태가 어떻게 변해 가는 지를 인과 관계에 의해 설명
수학적 조작	초기 조건들을 적용하여 문제 상황에서 요구하는 대상의 상태나 상호작용, 특성과 관련된 해를 수학적으로 도출 모형의 내적 요인과 외적 기준으로 모형의 대응 여부를 판단하는 단계.
타당화	1) 내적 요인 문제 상황과 모형 구조의 동형성, 선택된 개념 모형의 적합성, 분면간의 정합, 수학적 일관성 2) 외적 요인 문제에서 요구하는 해의 정밀함. 해와 제시된 보기와의 일치

추하였다. 또한 모형의 대응 여부는 A4, A3, A2 유형만을 대상으로 확인하였는데 이는 A1, ID, IG 유형은 모든 분면을 구성하여 구조적으로 완성된 모형을 구성하지 못했으므로 일괄적으로 대응된 모형을 구성하지 못한 것으로 판단하였다.

모둠원들의 역할은 Hogan *et al.*(1999)이 제시한 담화 유형 분석틀을 참고하였다. 본 연구에서는 일방적 상호작용과 쌍방적 상호작용에서 설명을 주도하는 참여자를 교수자, 수동적으로 반응하거나 질문을 하는 참여자를 피교수자로 분류하였다. 그 밖에 정교화 상호작용에 참여하는 모둠원은 세부적인 분류를 하지 않고 대등한 관계에서 상호작용하는 것으로 인식하였다.

참여자들의 모형 변화는 이신영 외(2012)의 모형 발달 유형을 참고하여 개별 모형의 변화 양상을 모형의 수용, 고수, 수정, 새로운 모형 생성으로 구분하였다. [표 3-5]에 소집단 상호작용 양상 범주화의 기준을 정리하였다.

[표 3-5] 소집단 상호작용 양상 범주화 기준

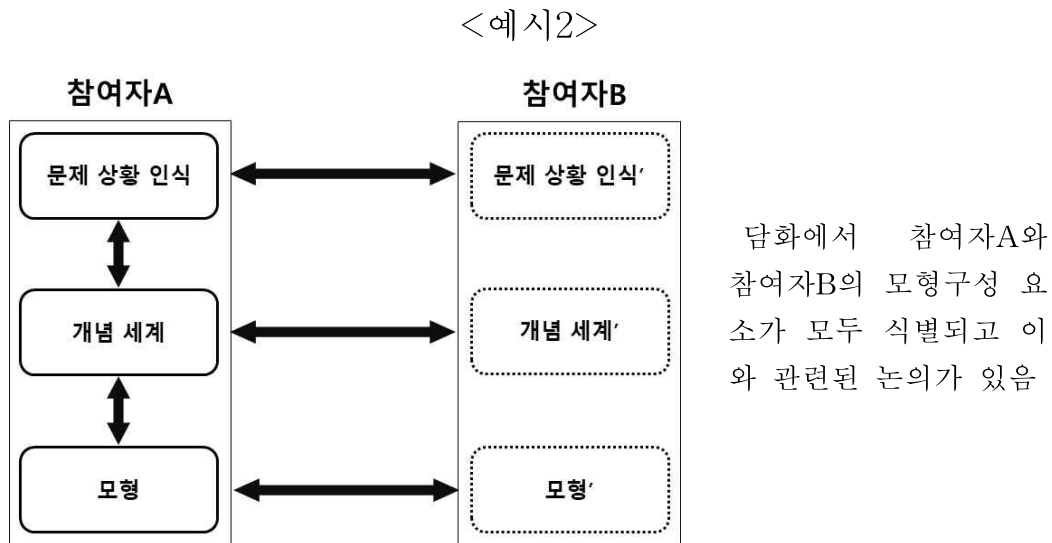
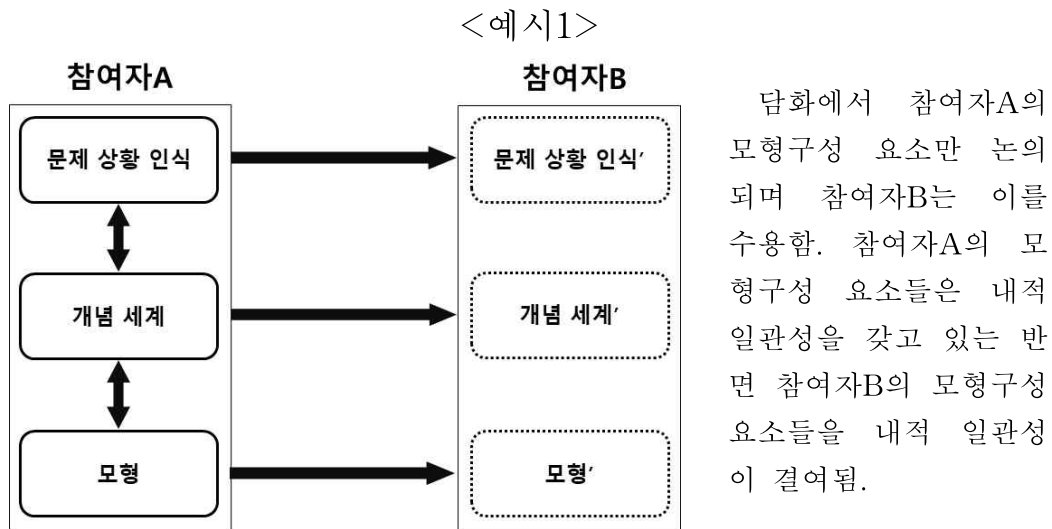
기준	분류	분석 자료
대응된 모형을 구성한 모둠원 수	2인 이상 1인 한 명도 없음	제출한 답안, 활동지, 전사 자료
선택된 개념 모형의 종류	등속직선 운동 모형 등가속도 운동 모형 충격에 의한 운동 모형 일-에너지 모형 역학적 에너지 보존 모형	활동지, 전사 자료
역할	교수자 피교수자 대등한 관계	전사 자료, 관찰 일지
모형의 변화 양상	수용 고수 수정 생성	전사 자료, 활동지

3.4.3. 소집단 상호작용의 모형구성에 미치는 영향

소집단 상호작용이 참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 분석하기 위해 소집단 상호작용을 [그림 2-18]에서 제시한 문제 상황 인식, 개념 세계, 모형의 세 가지 요소의 상호작용으로 세분화하였다.

문제 상황 인식은 문항에서 제시문의 구문적인 이해와 도식의 표상에 관한 것뿐만이 아니라 계의 설정과 기술자를 어떻게 인식했는가를 포함한다. 개념 세계는 개념 세계를 구성하는 이론과 개념 모형, 개념에 대한 진술로 파악하였다. 모형은 모형의 각 분면과 수학적 조작, 도출된 해에 대한 언급으로 분석하였다.

[그림 3-2]에서 모형구성 요소들의 상호작용 예시를 도식화하여 제시하였다. 과학적으로 타당한 모형구성 요소는 실선으로, 타당하지 않은 요소는 점선으로 표현하였다. 또한 모형구성 요소를 수평방향으로 연결하는 화살표가 일방향인 것은 담화에서 한 참여자의 요소만 명확하게 드러나고 다른 참여자들은 이를 수용하는 것을 의미한다(예시1). 반면 소집단 상호작용에 참여하는 모든 참여자들의 모형구성 요소가 드러난 경우는 양방향 화살표로 표현하였다(예시2). 참여자A는 모형구성 요소를 연결하는 수직 화살표가 있는 반면, 참여자B의 모형구성 요소는 화살표로 연결되지 않는다. 이는 참여자A의 모형구성은 세 요소가 일관성 있게 연결되고 있음을 의미하며 참여자B의 모형구성은 요소 간에 일관성이 없고 모순이 존재함을 나타낸다.



[그림 3-2] 모형구성 요소의 상호작용 예시

세 모형구성 요소 간의 상호작용이 참여자들의 모형구성 변화에 어떻게 영향을 미치는지 분석함으로써 소집단 상호작용이 참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 탐색하였다.

연구자가 해석한 결과는 물리교육 전문가 3인의 반복적인 검토를 거쳐 물리교육 전문가와 중등 물리 교사 및 대학원생들로 구성된 집단 세미나를 3회 이상 실시하여 연구 결과 해석 및 논의의 타당성을 점검하였다.

4. 결과 및 논의

4.1 모형구성의 유형과 어려움

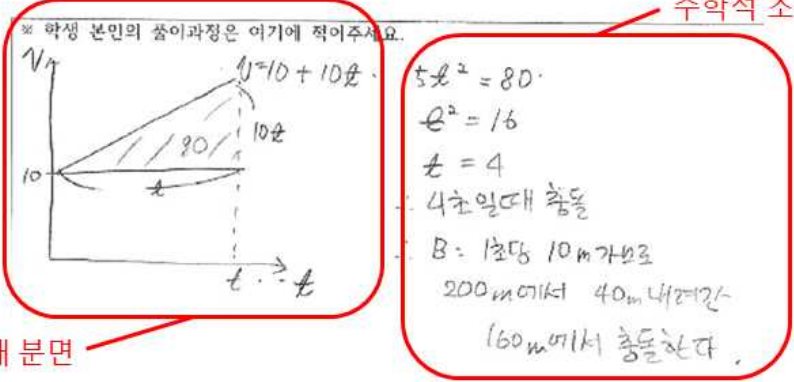
이 절에서는 뉴턴 역학 문제에 대한 참여자들의 모형구성을 유형화하고 각 문항별로 모형구성 유형의 분포를 기술하였다. 그리고 각 문항별로 동일한 유형의 모형구성을 한 참여자들의 일관된 특징을 식별하여 모형구성에서의 어려움을 분석하였다.

4.1.1 모형구성 유형

[표 2-13]에서 제시한 본 연구의 모형구성 분석틀을 바탕으로 참여자들이 응답 I 에서 개별적으로 작성한 활동지와 담화 자료를 분석하여 참여자들의 모형구성을 6가지 유형으로 범주화하였다.

1) 분면을 타당하게 구성하고 타당한 해를 구한 유형

문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 모든 분면을 타당하게 구성한 뒤 초기 조건들을 모형에 적용하여 타당한 해를 도출한 유형이다. 이 유형에 해당되는 참여자는 물리 문제해결에 관한 모형구성의 전 과정을 과학적으로 타당하게 수행한 것으로 해석할 수 있다. [그림 4-1]은 이 유형에 대한 대표적인 사례로 S4가 2번 문항에 대해 작성한 활동지와 담화자료이다.

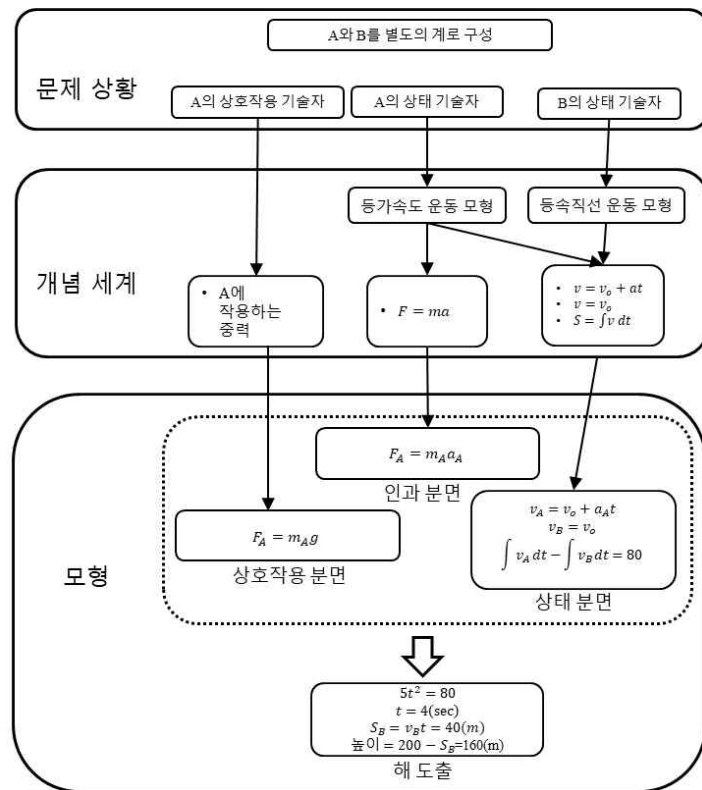
활동지	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.</p>  <p style="text-align: right;">수학적 조작</p> <p style="text-align: left;">상태 분면</p> </div>
담화 자료	<p>S4 : 이거는 그래프 문제야...80m인 상태에서 10m/s 나와 있으니까..10m/s에서 시작을 해야지...이게 그니까 일정 속도라 했을 때 이 상황이 A랑 애랑 80미터 떨어진 상태에 있을 때 A가 10m/s로 떨어지고 있다고 했으니까...그치? 그러면은 <u>A는 10m/s²주고 B는 그냥 쪽 10m/s야.</u> 애는 점점 더 빨리 내려가는데, 이렇게 둔 다음에 애가 80m였지. 충돌하면 80m가 딱 줄어들어야 하잖아. 그래서 A가 증가한 만큼의 거리가 80m가 돼야 해.</p> <p style="text-align: right;">상태 기술자 식별</p> <p style="text-align: center;">상호작용/인과 분면</p>

[그림 4-1] 모형 분면을 타당하게 구성하고 타당한 해를 구한 유형

먼저 S4는 문항에서 제시된 정보들을 바탕으로 물체 A는 일정한 가속도로, 물체 B는 일정한 속력으로 낙하하고 있음을 인지하고(상태 기술자 식별) 개념 모형으로 A는 등가속도 운동, B는 등속직선 운동 모형을 선택하였다. 상호작용 분면과 인과 분면은 A의 가속도를 10m/s^2 로 구하는 과정에서 확인할 수 있었다. S4는 물체 A와 B의 시간에 따른 상태 변화를 그래프로 표현하였다(상태 분면). S4는 그래프를 그리는 과정에서 어떠한 개념 세계의 요소를 인출하였는지 세부적인 내용은 설명하지 않았으나 암묵적으로 등가속도 운동과 등속 직선 운동에서의 상태 기술자들의 관계를 적용한 것으로 보인다. 최종적으로 S4는 v-t 그래프에서 A와 B의 넓이차가 80이 되는 t에 대한 방정식을 구성하고 t값을 구하였다. 그리고 $S_B = 40(\text{m})$ 임을 통해 160m 상공에서 A와 B가 충돌한다는 최종

해를 도출하였다(수학적 조작).

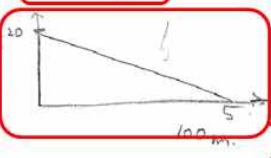
[그림 4-2]에 2번 문항에 관한 S4의 모형구성 과정을 도식화하여 표현하였다.



[그림 4-2] 2번 문항에 대한 S4의 모형구성

2) 모형을 타당하게 생성했으나 수학적 조작에서 오류를 범한 유형

이번 항목에서 다룬 유형은 학습자가 문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 각 분면을 타당하게 구성한 경우이다. 1)과의 차이점은 수학적 조작 단계에서 계산 오류를 범하여 타당하지 않은 해를 구했다는 점이다. [그림 4-3]은 이 유형에 대한 대표적인 사례로 S4가 4번 문항에 대해 작성한 활동지와 답화자료이다.

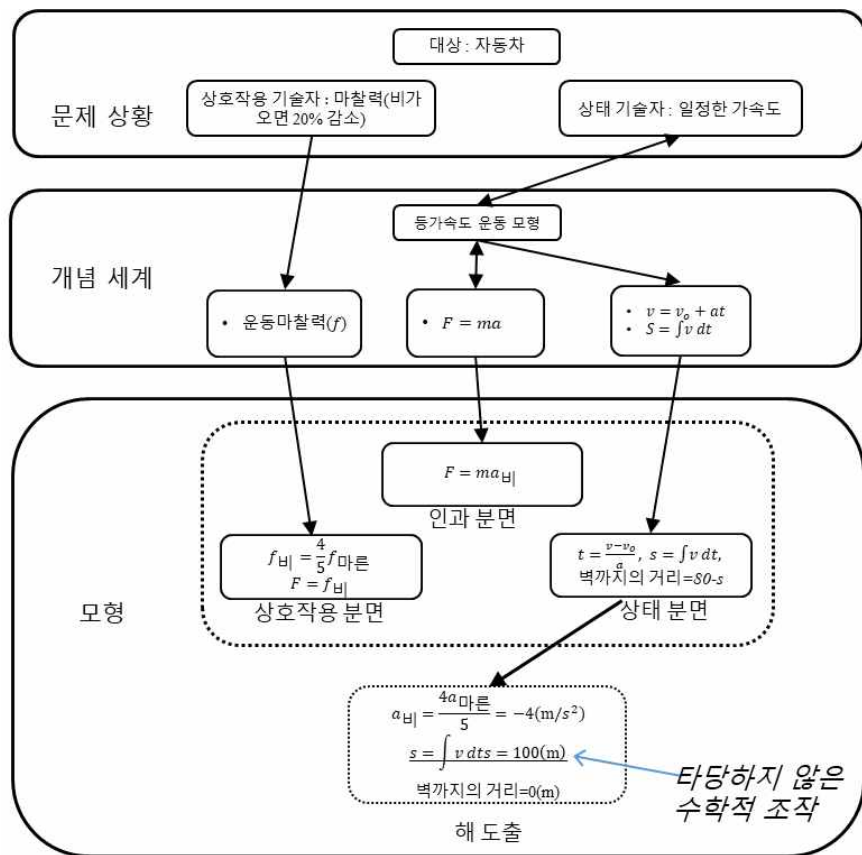
활동지	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>상호작용 기술자 식별</p> <p>※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.</p> <p>$a = -\frac{20}{4} = -5$</p> <p>$F = -5m$</p> <p>마찰력 20% 감소라니</p> <p>$F = -5m \times \frac{4}{5} = -4m$</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>상태 기술자 식별</p> <p>$a = -4 \frac{m}{s^2}$</p> <p>인과 분면</p>  <p>상태 분면</p> </div> </div> <hr/> <p>※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요</p> <p>$20 \times 5 \times \frac{1}{2}$ <u>20m가 아닌 10m</u> 타당화</p> <p>원래: $20 \times 5 = 100m$ ∴ 20m 추가이므로</p> <p style="text-align: right;">타당하지 않은 수학적 조작</p>
담화 자료	<p>S4: 3번이 맞다고?...나 이거 식 어떻게 했냐면...이거 삼각형 공식 안 써서 20×5에다가 100m하니까...잘못 푼 거 같아.</p>

[그림 4-3] 모든 분면을 타당하게 구성했으나 계산 오류를 범한 유형

이 유형의 대표적인 사례인 4번 문항의 S4는 먼저 그래프로 제시된 자동차의 운동 상태를 해석하여 자동차가 일정한 크기($a = 4m/s^2$)의 가속도로 운동하고 있음을 인지한 것으로 판단된다(상태 기술자 식별). 마찰력이 20% 변한다는(상호작용 기술자 식별) 정보를 바탕으로 상호작용 분면과 인과 분면을 구성하여 대상의 가속도를 구하였다. 그리고 등가속도 운동 모형을 선택하여 속도-시간 그래프로 자동차의 속도 변화를 기술한 뒤(상태 분면) 그래프의 넓이를 계산하여 변위를 계산하는 과정에서 오류를 범하였다(타당하지 않은 수학적 조작). 담화 자료를 보면 S4는 정답을 제출한 이후에 스스로 그래프의 넓이를 구하는 과정에서 오류를 범했음을 확인한 것으로 보인다(타당화). S4와 같이 모든 분면을 타당하게 구성했으나 수학적 조작에서 계산 오류를 범한 경우를 1)과 구분하여 별개의 유형으로 분류하였다.

[그림 4-4]에 S4의 모형구성 과정을 도식화하여 표현하였다. 4번 문항

의 경우 제시문에서 자동차의 운동 상태를 그래프로 제시했기 때문에 상태 기술자를 식별하기 위해서는 등가속도 운동 모형에 대한 이해가 필요하다. 따라서 [그림 4-4]에서 등가속도 운동 모형과 상태 기술자를 연결하는 화살표를 양방향으로 표시하였다. 이와 같이 개념 세계는 모형을 생성하기 위한 모형의 요소 역할을 수행할 뿐만이 아니라 문제 상황을 인식하기 위한 도식으로써의 기능을 포함하고 있다(Lopes & Costa, 2007).



[그림 4-4] 4번 문항에 대한 S4의 모형구성

3) 모든 분면을 구성하였으나 일부 분면의 타당성 결여된 유형

이 유형은 참여자가 문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형을 생성하였으나 일부 분면의 타당성이 결여된 경우이다. [그림 4-5]는 이 유형의 대표적인 사례로 7번 문항 S8의 활동지와 담화자료이다.

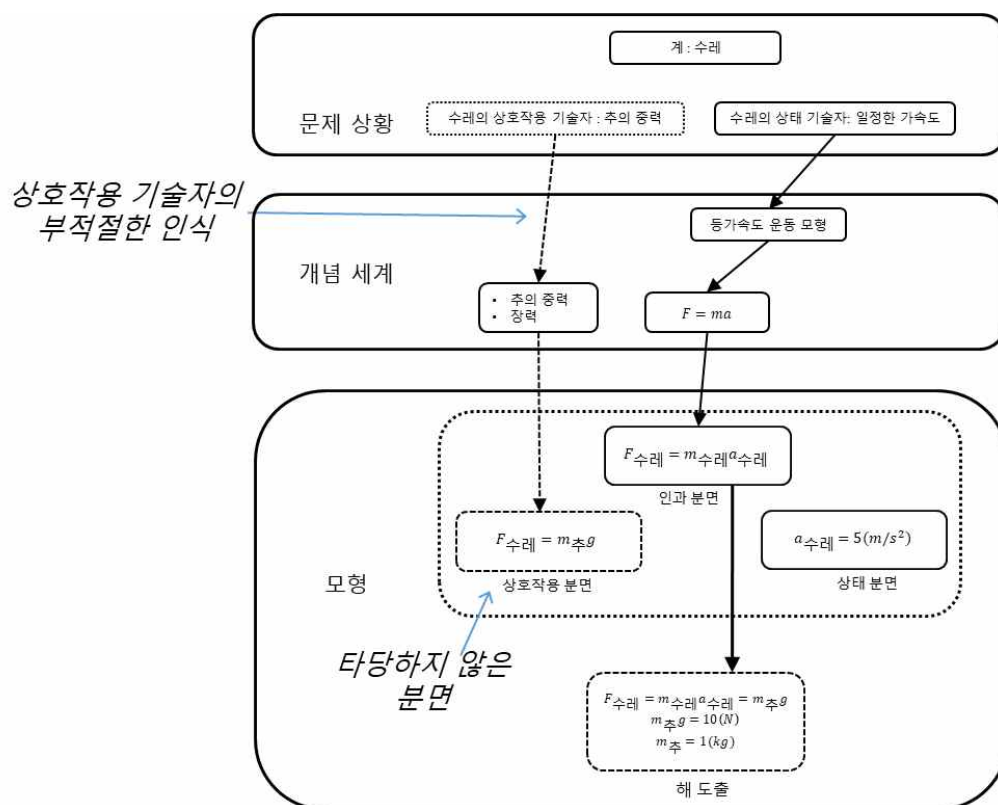
활동지	<p>* 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> $F=ma$ $=2 \times 5 = 10$ $\therefore F = 10N$ </div> <div style="border: 1px dashed red; padding: 5px;"> $10N = m \times 10$ $\therefore m = 1$ $\therefore \text{추 1개}$ </div> </div> <p style="text-align: right;">상호작용 분면</p> <p style="text-align: center;">수학적 조작</p> <p style="text-align: left;">인과 분면</p>
담화 자료	<p>S8: 일단 수레에 힘이 몇 N 작용하고 있어?...오케이 그럼 $F=10N$ 그치? (활동지를 가리키면서) 근데 여기서 수레 한테 뭐가 힘을 작용하고 있어?...추가 작용하고 있지. 추, 추의 힘이 몇이야? $10n$이지 $10n$, 추가 n개 있을 때, 그럼 $10n$, 그럼 $10N$의 힘을 내겠지. 근데 이게 $10n$과 같 다 그래서 n이 1.</p> <p style="text-align: right;">상호작용 기술자 식별</p>

[그림 4-5] 일부 분면의 타당성 결여된 유형(7번 문항 S8)

S8은 기술자 식별 단계에서 수레의 가속도가 일정하다는 것을 암묵적으로 인지하고 뉴턴의 운동 2법칙을 적용하여 먼저 수레에 작용하는 알짜힘을 구하였다(인과 분면). 그러나 상호작용 분면을 형성하는 과정에서 수레에 작용하는 장력을 포함하지 않고 추의 중력만을 적용하여 상호작용 분면을 형성하였다(상호작용 분면). 이는 S8이 추의 중력을 수레에 작용하는 상호작용으로 오인했기 때문이다(상호작용 기술자 식별). 상호작용 기술자에 대한 부적절한 식별로 인해 상호작용 분면 역시 타당성이 결여되게 된다. 결국 S8은 수학적 조작 단계에서 초기 조건을 대입하여 적절하게 대입하였음에도 불구하고 타당하지 않은 해를 구하게 되었다. S8은 모든 분면을 구성하여 해를 도출했다는 점에서 1)과 2)의 사례들과

마찬가지로 완성된 모형을 생성했다고 할 수 있다. 그러나 타당하지 않은 상호작용 기술자 식별로 인해 일부 분면의 타당성이 결여되었다.

[그림 4-6]에 7번 문항에 관한 S8의 모형구성을 도식화하여 표현하였다. 앞에서 제시한 활동지와 담화 자료에서는 상태 기술자의 식별과 개념 모형의 선택이 드러나지 않았다. 이는 연구자가 S8이 작성한 활동지와 담화자료를 바탕으로 추론한 것으로 S8의 이러한 과정은 암묵적 혹은 무의식적으로 이루어진 것으로 보인다.



[그림 4-6] 7번 문항에 대한 S8의 모형구성

4) 일부 분면만을 구성한 유형

이 유형은 참여자가 대상의 기술자를 식별하고 이에 적합한 개념 모형을 선택하였으나 일부 분면만을 구성한 경우이다. [그림 4-7]은 이 유형에 대한 대표적인 사례인 S13이 8번 문항에 대해 작성한 활동지와 담화

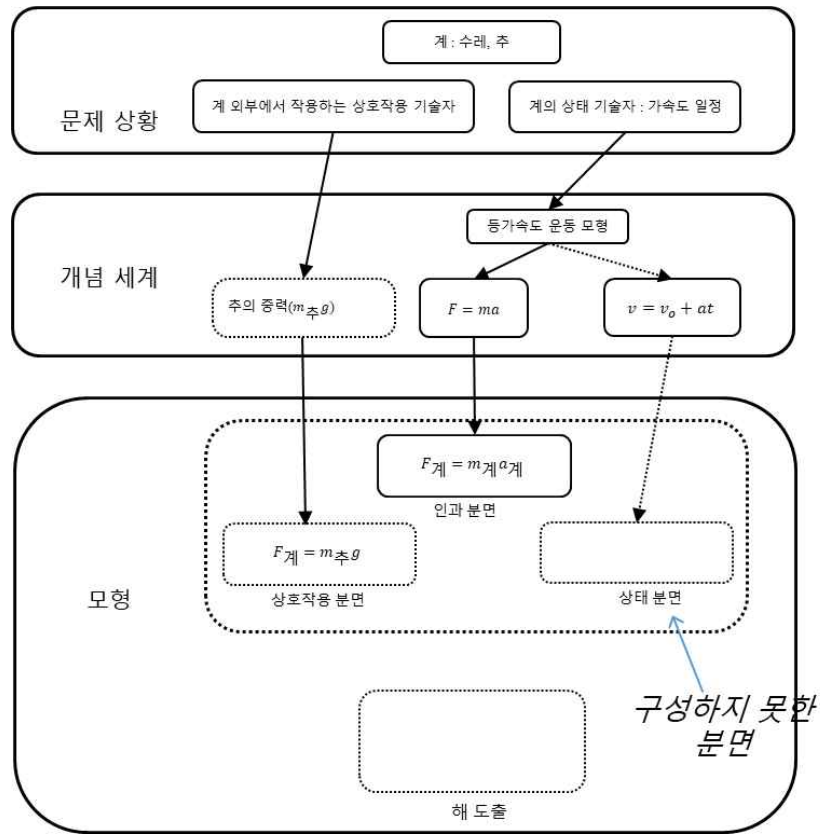
자료이다.

활동지	<p>※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> $\frac{10}{2+1} = \frac{10}{3} \text{ m/s}^2$ </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;"> $\frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times \frac{10}{3} \times 2^2 = 29$ $\frac{1}{2} \times \frac{10}{3} \times 2^2 = 29$ </div> </div> <p style="color: red; margin-top: 10px;">상호작용/ 인과 분면</p> <p style="color: red; margin-top: 10px;">속도에 관한 상태 분면을 구성하지 못함</p>
담화 자료	<p>S13: <u>(10번 활동지에 공식을 쓰며) 야 이거 공식이 이거냐?</u></p> <p>S10: 응. 이거 거리.</p> <p>S13: <u>거리라고?</u></p>

[그림 4-7] 일부 분면만을 구성한 유형

[그림 4-7]에서 상호작용과 인과 분면에 해당되는 수식을 보면 S13은 수레와 추를 하나의 계로 설정한 뒤 추의 중력에 관한 상호작용 분면을 구성한 것으로 해석된다. 이후 S13은 등가속도 운동 모형을 선택하여 인과 분면을 형성하고 이를 통해 수레의 가속도를 구하였다. 그러나 속도에 관한 상태 분면이 아니고 거리에 대한 상태 분면의 구성을 시도하는 바람에 S13은 상태 분면을 타당하게 형성하지 못하게 되었다. 이는 S13의 등가속도 운동 모형의 속도와 거리의 관계에 대한 이해가 충분하지 못했기 때문으로 보인다.

[그림 4-8]에 8번 문항 S13의 모형구성을 도식화하였다. S13은 적합한 상태 분면을 형성하지 못해 결국 문제에서 요구하는 해의 도출에 실패하였다. 따라서 [그림 4-8]에서는 상태 분면과 해 도출을 공란으로 표시하였다.



[그림 4-8] 8번 문항에 대한 S13의 모형구성

5) 부적절한 개념 모형을 선택한 유형

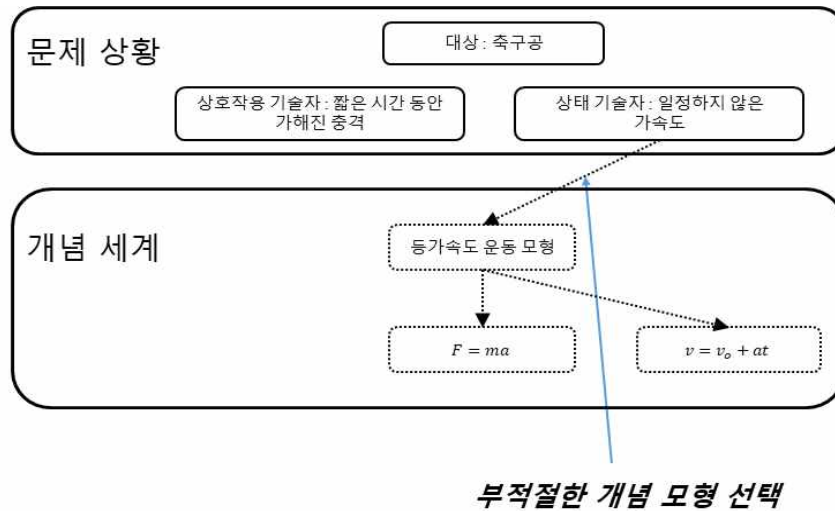
이 유형은 참여자가 타당한 기술자 식별을 기반으로 문제 상황에 부적절한 개념 모형을 선택한 유형이다. [그림 4-9]는 이 유형의 대표적인 사례인 S25가 11번 문항에 대해 작성한 활동지와 전사 자료이다.

활동지	<p>풀이과정은 여기에 적어주세요</p> <p>$200N = 0.5 kg \times a$</p> <p>$a = 400 \div 0.03$</p> <p>$= 12m/s.$</p> <p>$0m/s \rightarrow 12m/s.$</p> <p>부적절한 개념 모형 채택</p>
담화 자료	<p>S25: 그냥 속도 구하라니까 속도 있는 거 다 구했는데, 애 힘 이잖아...아 그러면 애(가속도)를 400으로 두고...근데 애가 힘이니까 질량 나누면 가속도이고, 속력이 나오는 데...</p>

[그림 4-9] 부적절한 개념 모형을 선택한 유형

11번 문항은 앞의 문항들과 달리 계의 가속도가 일정하지 않고 시간에 따라 변하는 상황에 관한 것이었다. 따라서 등가속도 운동 모형 대신 충격에 의한 운동 모형을 선택하여야만 해결이 가능한 문항이다. 그러나 담화 자료와 활동지에서 드러나듯이 S25는 문제 상황에 적절한 개념 모형을 선택하지 않고 등가속도 운동 모형을 선택하고 임의로 초기 조건을 대입하여 해를 구였다. 이렇게 참여자가 문제 상황에 부적절한 개념 모형을 선택하여 모형을 생성한 경우를 별도의 유형으로 분류하였다. 이 유형의 학생들은 적절한 기술자 식별이 뒷받침되지 않았거나 적합한 개념 모형에 대한 지식이나 이해가 부족하여 자신이 개념 모형을 임의적으로 선택한 것으로 보인다(Halloun, 2006).

[그림 4-10]에서 11번 문항에 대한 S25의 모형구성을 도식화하여 설명하였다.

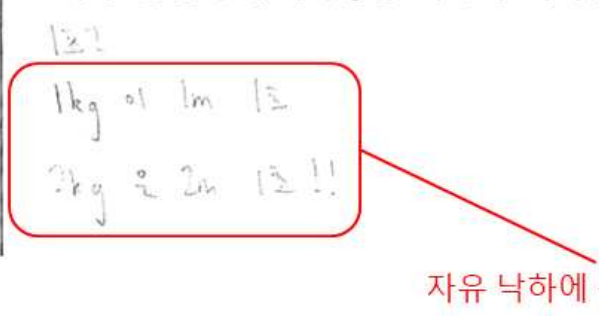


[그림 4-10] 11번 문항에 대한 S25의 모형구성

6) 비과학적인 직관이나 추측을 통해 해를 선택한 유형

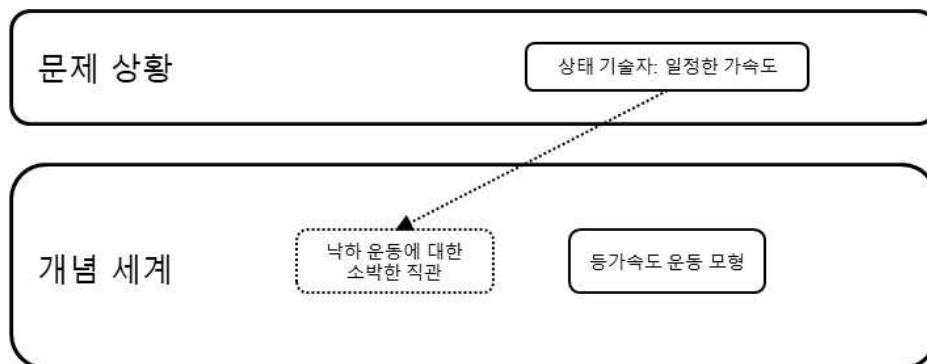
이 유형은 참여자가 문제 상황에 적합한 과학적인 개념 모형을 선택하지 않고 직관이나 추측에 의해 정답을 선택하는 경우이다. 5)의 유형이 문제 상황에 대응되지는 않았지만 그 자체로는 과학적 개념 모형을 선택한 것과 달리 이 유형에서는 과학적인 개념 모형을 선택하지 않고 직관에 의해 정답을 추정하는 경우이다. [그림 4-11]은 이 유형의 대표 사례로 S20이 1번 문항에 대해 작성한 활동지와 담화 자료이다.

담화 자료에서 구체적으로 드러나듯이 S20은 무거운 물체가 가벼운 물체에 비해 낙하 속도가 더 빠르며 낙하 시간은 높이에 비례한다는 직관적인 사고에 의거하여 해를 선택하였다. 대상의 상태 및 상호작용 기술자에 관한 명확한 인식이 드러나지 않으며 적합한 개념 모형을 선택하는 과정도 나타나지 않았다. 대신 S20은 개념 세계의 소박한 이론을 통해 문제 상황을 설명하고자 한다. 이렇게 문제 상황에 대한 기술자 식별과 적합한 개념 모형을 선택하는 과정이 드러나지 않고 참여자들이 소박한 이론에 기반한 직관이나 추측을 통해 직접적으로 해를 선택하는 유형이 마지막으로 식별되었다.

활동지	 <p>1초?</p> <p>1kg 이 1m 1초</p> <p>2kg 은 2m 1초!!</p> <p>자유 낙하에 관한 소박한 직관</p>
담화 자료	<p>S20: 1kg이 1m를 떨어지는데 1초가 걸렸잖아. 그럼 2kg이 2m에서 떨어지는데 몇 초가 걸리겠어? <u>똑같이 1초가 걸리지. 질량이 따블 됐잖아. 따블. 질량이 따블되고 높이도 따블됐으니까.</u></p>

[그림 4-11] 비과학적인 직관이나 추측을 통해 해를 선택한 유형

[그림 4-12]에서 1번 문항에 대한 S20의 모형구성을 도식화하였다. S20이 문제 상황에 적절한 과학적 개념 모형 혹은 개념들을 인출하지 않고 낙하 시간은 높이에 비례하고 질량에 반비례한다는 소박한 직관을 이용한 것을 점선 화살표로 표현하였다.



[그림 4-12] 1번 문항에 대한 S20의 모형구성

7) 유형 분류 불가

일부 사례의 경우 활동지나 전사 자료에서 참여자의 모형구성 과정과 결과가 전혀 언급되지 않아 모형구성을 분류하기에 정보가 부족하였다. 본 연구에서는 이 경우를 분류 불가로 표현하였다.

앞에서 정리한 모형구성 유형들을 [표 4-1]에 요약하여 정리하였다.

[표 4-1] 본 연구 참여자들의 모형구성 유형

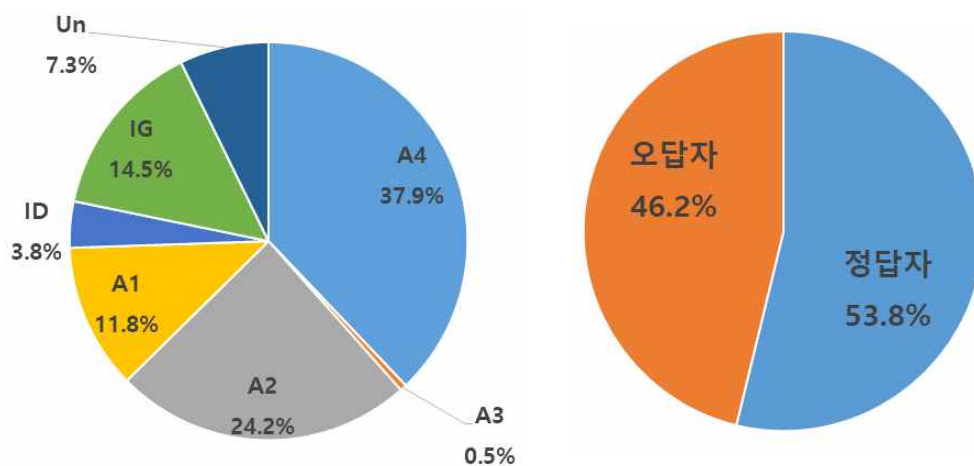
유형	코드	설명
모형의 모든 분면을 타당하게 구성	A4	문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 모든 분면을 타당하게 구성함. 초기 조건들을 모형 분면에 적용하여 타당한 해를 도출함
모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함	A3	문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 모든 분면을 타당하게 구성함. 초기 조건들을 적용하여 해를 도출하는 과정에서 수학적인 오류를 범함
모든 분면을 구성하였으나 일부 분면의 타당성 결여	A2	문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 모든 분면을 구성했으나 일부 분면의 타당성이 결여됨. 초기 조건들을 타당성이 결여된 모형 분면에 적용하여 해를 도출함
일부 분면만을 구성	A1	문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하였으나 일부 분면만을 구성함
부적절한 개념 모형 선택	ID	문제 상황의 특정 유형에 부적합한 개념 모형을 선택함
직관이나 추측에 의한 해의 선택	IG	문제 상황에 개념 모형을 선택하지 않고 비과학적인 직관이나 추측을 통해 해를 선택함
분류 불가	Un	활동지나 담화를 통해 학습자의 과학적인 모형구성 과정과 결과를 확인할 수 없음.

8) 모형구성 유형 분포와 정답률 비교

[그림 4-13]에서 12개 문항, 372건의 모형구성 유형 분포와 정답률을 비교하였다. 12개 문항 372건의 모형구성 유형 중에서 가장 많은 비중을

차지하고 있는 유형은 모든 분면을 타당하게 구성(이하 A4)로서 전체의 37.9%를 차지하고 있다. 모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함(이하 A2)이 24.2%로 그 뒤를 잇고 있다. 직관이나 추측에 의한 해의 선택(이하 IG), 일부 분면만을 구성(이하 A1), 분류 불가(이하 Un), 부적절한 개념 모형 선택(이하 ID) 등은 15% 미만의 작은 비중을 차지하고 있다. 모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함(이하 A3)은 단 2건(0.5%)에 불과하여 대부분의 학생들은 분면을 타당하게 형성하면 수학적 조작에서는 실수를 하지 않는 것으로 나타났다.

전체 문항의 모형구성 유형 분포와 정답률을 비교해보면, 모형구성의 관점에서 가장 타당한 모형을 구성한 A4 유형(37.9%)과 정답자(53.8%)의 비중은 상당한 격차를 보이고 있다[그림 4-13]. 즉, A4 유형을 모두 정답자라고 간주해도 타당한 모형을 구성하지 못한 참여자들의 1/4 정도를 정답자로 간주해야 이 차이를 설명할 수 있다. 이러한 결과는 정답이 반드시 학생들의 타당한 모형구성을 의미하지 않으며 물리 문제해결에 관한 질적 분석의 당위성을 제공한다고 볼 수 있다.



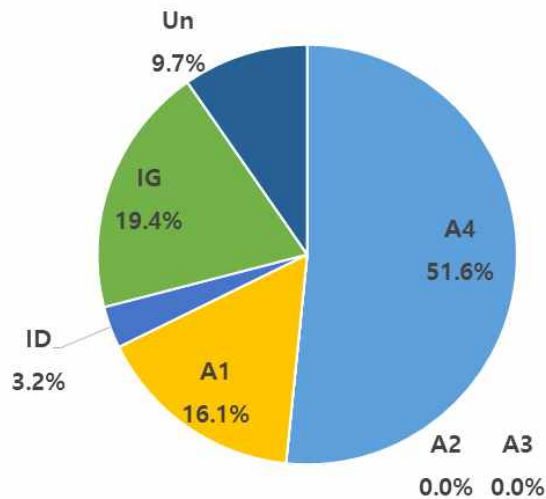
[그림 4-13] 전체 문항의 모형구성 유형 분포와 정답률 비교

4.1.2. 모형구성에서 학생들의 어려움

본 절에서는 각 문항별로 동일한 유형의 모형구성을 한 참여자들의 일관된 특징을 식별하여 모형구성에서의 어려움을 분석하였다. 본 연구에 참여한 학생은 총 32명이나 1차시(1번 문항~6번 문항)에서는 S18이, 2차시(7번 문항~12번 문항)에 S3이 결시했으므로 각 문항별 31명의 학생들만을 대상으로 분석이 진행되었다. 따라서 각 문항별 모형구성 사례는 31건이며, 전체 문항의 사례는 372건이었다.

1) 1번 문항

1번 문항은 중력장에서 자유 낙하하는 물체의 낙하 거리와 시간에 관한 문항이다. 문제 상황에서 1개 물체만을 다루고 상호작용이 중력 이외에는 없어 다른 문항들에 비해 상대적으로 모형구성이 복잡하지 않다. [그림 4-14]에 1번 문항의 모형 구성 유형 분포를 나타냈다.



[그림 4-14] 1번 문항의 모형구성 유형 분포

1번 문항의 모형구성 유형 분포에서 주목할 부분은 A4의 비율이 상대적으로 높은 반면, A3과 A2는 1건도 없었다는 점이다. 특히, A2 유형의

참여자가 한 명도 없었다는 것은 1번 문항은 등가속도 운동 모형을 선택하면 비교적 수월하게 모든 분면을 구성할 수 있었던 것으로 해석할 수 있다.

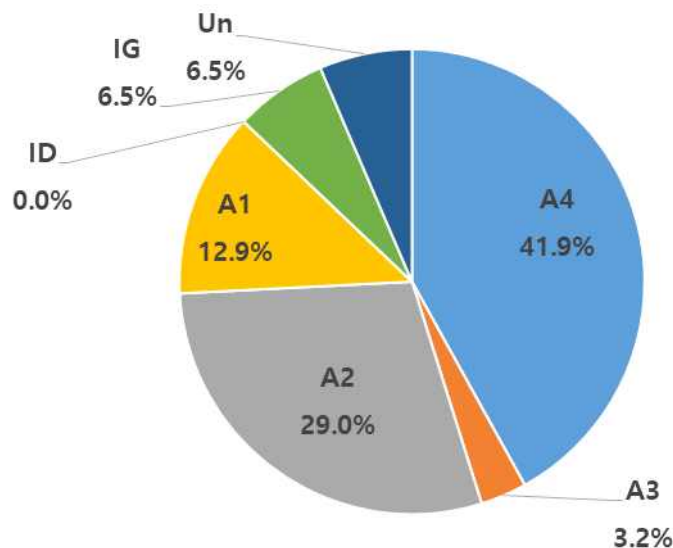
[표 4-2]에서 A4 유형을 제외한 참여자들의 어려움을 기술하였다. A1 유형에 속한 5명의 참여자 중에서 3명은 인과 분면과 상호작용 분면을 구성했지만 상태 분면을 구성하지 못했다. 이는 등가속도 운동의 위치와 시간, 가속도 간의 관계식인 $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 에 대한 상기가 잘 이뤄지지 않은 탓으로 여겨진다. 본 연구의 1차시 수업이 학생들이 뉴턴의 운동 법칙을 학습한 지 5개월가량 지났음을 감안할 때 수업하는 시점에서 일부 참여자들의 등가속도 운동과 관련된 개념 간의 관계나 공식의 상기가 잘 이뤄지지 않은 것으로 해석할 수 있다. IG 유형의 참여자들은 무거운 물체가 가벼운 물체에 비해 낙하 속도가 더 빠르며 낙하 시간은 높이에 비례한다는 직관적인 사고에 의거하여 정답을 선택하였다. 이들은 문제 상황에 대응되는 과학적인 개념 모형을 선택하지 않았으며 등가속도 운동 모형과 관련된 개념이나 지식을 활용하여 모형을 생성하지 못했다.

[표 4-2] 1번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A1	3, 13, 26	인과 분면과 상호작용 분면은 구성했으나 두 물체의 상태 분면을 구성하지 못함
	1, 27	역학적 에너지 보존 모형을 선택하였으나 속도와 낙하 시간이 비례한다는 것에 대한 상태 분면을 구성하지 못함
ID	20	중력에 의한 퍼텐셜에너지를 구한 다음 이 값이 시간에 비례한다고 임의적으로 판단함
IG	7, 8, 11, 23, 25, 32	낙하시간과 질량이 비례하고 높이에 반비례한다는 직관에 기반하여 해를 선택함

2) 2번 문항

2번 문항은 1번 문항과 마찬가지로 자유낙하에 관한 상황을 제시하고 있으나 대상이 복수이며 대상들의 시간에 따른 상태 변화가 상이하다는 점에서 차이를 보인다. 물체 A는 등가속도 운동, 물체 B는 등속 직선 운동을 하고 있다. [그림 4-15]에 2번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다.



[그림 4-15] 2번 문항의 모형구성 유형 분포

2번 문항은 고전적인 통계상으로는 1번 문항과 정답률이 큰 차이를 보이지 않아 비슷한 난이도의 문항으로 받아들일 수 있다(1번 문항 정답률 67.7%, 2번 문항 정답률 64.5%). 그러나 모형구성 유형으로 분석한 결과 2번 문항은 1번 문항에 비해 A4가 10%로 하락했으나 A2는 29%로 큰 폭으로 증가하여 모든 분면을 구성한 참여자들(A4+A3+A2)의 비율(75%)이 1번 문항에 비해 훨씬 높은 수치를 보이고 있다. 또한 ID와 IG유형의 합이 7%에 불과하여 1번 문항에 비해 과학적인 개념 모형을 선택하여 모형구성을 시도한 참여자들이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

[표 4-3]에서 A4 유형을 제외한 참여자들의 모형구성 어려움을 기술하였다. 2번 문항의 A2, A1 유형의 참여자들은 모두 상태 분면으로 인

해 타당한 모형을 생성하지 못하였다. 즉, 일부 참여자들은 두 물체의 상대적인 위치를 고려하여 두 물체의 이동 거리를 하나의 좌표계에서 표현하는 것에 어려움을 겪고 있는 것으로 보인다. A2 유형으로 분류된 일부 참여자들(S7, S11, S25)은 시간에 따른 A, B의 위치를 열거하여 만나는 시간을 찾고자 했으나 구간별 평균속도를 잘못 산출하여 정확한 시간을 도출할 수 없었다. 이들은 A, B의 위치가 가장 근접한 시간을 자신들의 해로 선택하였다. 1번 문항의 학습 효과 때문에 등가속도 운동 모형의 상태 기술자들의 관계를 묻거나 자유 낙하에 관한 소박한 직관에 의해 해를 선택한 참여자들은 거의 관찰되지 않았다.

[표 4-3] 2번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

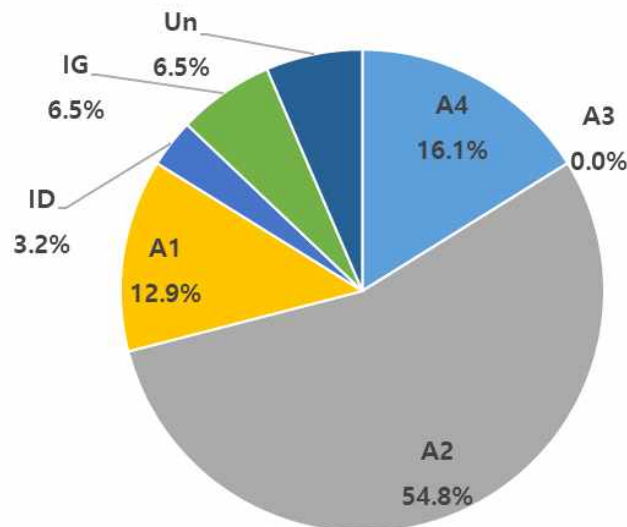
모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A3	17	v-t 그래프로 상태 분면을 생성한 뒤에 그래프의 넓이를 계산하여 해를 도출하는 과정에서 오류를 범함
A2	2, 12, 15, 26, 27, 30	상태 분면에서 물체A와 물체B의 낙하거리에 관한 관계식이 타당하지 않음
	7, 11, 25	상태 분면에서 일정한 시간 구간별 이동거리를 계산하는 과정에서 각 구간의 평균 속도를 각 구간의 처음 속도로 오인함
A1	16, 31, 32	B의 상태 분면을 구성하지 못함
	3, 31	A와 B의 상태 분면을 모두 구성하지 못함
IG	8, 20	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

3) 3번 문항

3번 문항은 1, 2번 문항과 달리 중력이 아닌 지면과의 마찰력에 의해

물체가 등가속도 운동하는 상황을 제시한다. 타당한 문제해결을 위해서 브레이크를 밟은 후 자동차가 멈출 때까지의 시간이 아닌 벽을 발견 후 적어도 몇 초안에 브레이크를 밟는가에 관한 제시문의 요구 사항을 명확하게 이해해야 한다.

[그림 4-16]에 2번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 3번은 전체 문항 중에서 모형구성의 유형 분포가 독특한 문항이다. 3번 문항은 전체 문항 중에서 A4의 비율이 가장 낮고 A2의 비율은 가장 높게 나타났다. 그림에도 불구하고 정답률은 평균을 상회하는데(71.0%) 이는 A2로 분류된 대부분의 참여자들이 모형의 타당성과는 별개로 정답을 선택했기 때문이다.



[그림 4-16] 3번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-4]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 3번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. A2로 분류된 참여자들의 대다수가 브레이크가 작동하기까지의 시간을 브레이크가 작동한 시간으로 오인하여 상태 분면을 구성하였다. 타당하지 않은 모형임에도 불구하고 모형의 해가 정답과 일치하여 많은 학생들이 별 의심 없이 정답을 선택한 것으로 보인다. 이

를 통해 선다형 문항의 경우 학생들이 모형 타당성을 검증하는 단계에서 보기에 자신의 해가 있는지가 매우 중요한 기준이 된다는 것을 알 수 있다. 즉, 참여자들은 모형의 적합성과 같은 내적 요인보다는 보기와 해의 일치와 같은 외적 요인이 모형 타당화의 일차적인 기준이 되는 것으로 해석된다.

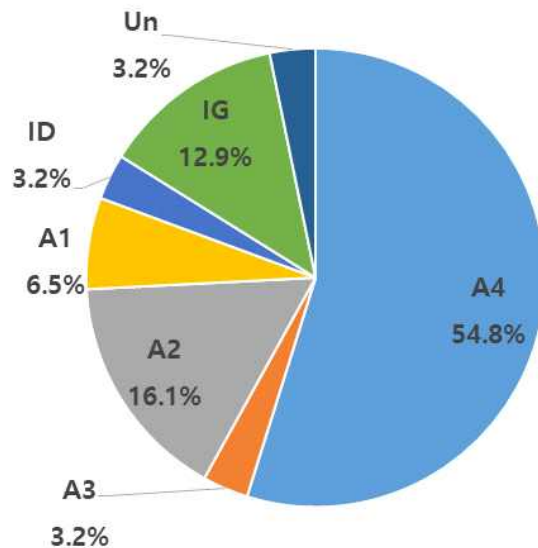
[표 4-4] 3번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	1, 2, 3, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 23, 24, 26, 31, 32	기술해야 하는 물체의 운동 시점을 오인하여 상태 분면을 구성함
	19	마찰력 이외에 수평방향으로 작용하는 힘이 있다고 판단하고 상호작용과 인과분면을 구성함.
A1	25, 27	자동차의 이동거리에 대한 상태 분면을 구성하지 못함
	12	일-에너지 모형을 적용하려고 했으나 인과 분면을 구성하지 못함
	22	속도에 대한 시간의 함수를 적분하여 위치를 구하고자 했으나 적분 과정에서 초기 조건을 적절하게 설정하지 못함.
ID	7	운동량 공식에 변인을 대입한 뒤 나온 결과 값으로 해를 추정함
IG	8, 30	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

4) 4번 문항

4번 문항은 3번 문항과 문제 상황의 물리적인 계는 거의 유사하다. 마찰력이 작용하는 자동차가 벽 앞에서 제동을 거는 상황이 3번과 일치하는데 차이점은 마찰력의 크기가 명시적으로 제시되지 않고 그래프를 통해 주어졌다는 것과 문항의 해가 시간이 아닌 거리라는 점이다.

[그림 4-17]에 4번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 4번 문항은 전체 문항 중 유일하게 정답률과 A4 유형의 비율이 일치하는 문항이다. 4번 문항의 정답률은 3번 문항에 비해 하락했으나(3번 문항 정답률 71.0%, 4번 문항 정답률 54.8%) A4의 비율은 큰 폭으로 증가하여 정답률과 모형구성 유형 분포의 변화가 서로 상반된 경향을 보이고 있다.



[그림 4-17] 4번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-5]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 4번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. A2로 분류된 5명 중 4명이 벽까지의 거리를 자동차가 이동한 거리를 오인하여 상태 분면을 구성하였다. 이는 타당하지 않은 기술자 식별이나 개념 모형을 적용하는 방법에 관한 인지적 결핍보다는 문항 제시문에 대한 이해와 주의가 부족했던 탓으로 여겨진다. 3번 문항에 비해 IG 유형이 2명 이상 증가하였는데 이는 4번 문항에서는 시간을 매개로 하지 않고 이동거리와 속도, 가속도간의 관계로 상태 분면을 구성해야 수학적 조작이 용이하기 때문이다. 시간을 매개하지 않은 상태 분면 구성에 일부 참여자들이 어려움을 느끼고 있는 것으로 파악된다.

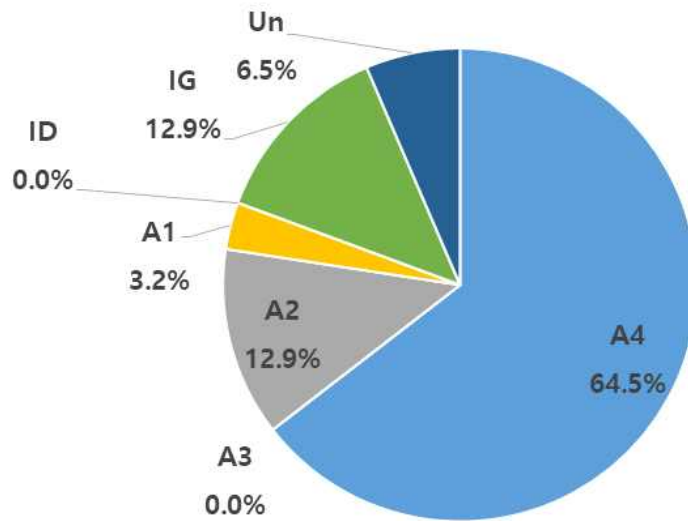
[표 4-5] 4번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A3	4	모든 분면을 타당하게 구성하였으나 그래프의 넓이를 구하는 과정에서 계산 오류를 범함
A2	14, 29, 30, 31	상태 분면에서 자동차의 이동 거리(s)를 벽까지의 거리(80-s)로 오인함
	19	마찰력의 변화를 고려하지 않고 상호작용 분면을 구성함
A1	22	상태 분면에서 자동차의 속도에 관한 함수를 구하고 이를 적분하여 위치에 함수를 구하고자 했으나 위치에 대한 초기 조건을 적절히 설정하지 못함
	25	자동차의 상태 분면을 구성하지 못함
ID	20	적절한 모형 구성 과정 없이 문제에서 주어진 v-t그래프의 넓이를 해라고 판단함
IG	3, 6, 12, 27	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

5) 5번 문항

5번 문항은 마찰력이 작용하고 있는 상태에서 등속직선 운동하고 있는 카트에 관한 것이다. 마찰력이 문제 상황에서 명시적으로 제시되지 않았기 때문에 참여자들이 초기 조건을 통해 이를 유추해야 한다.

[그림 4-18]에 5번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 5번은 전체 문항 중에서 A4의 비중이 가장 큰 문항이다. 반면 A2와 A1의 비중은 작은 편으로 적절한 개념 모형을 선택한 참여자 대부분은 모든 분면을 타당하게 생성한 것으로 볼 수 있다.



[그림 4-18] 5번 문항의 모형구성 유형 분포

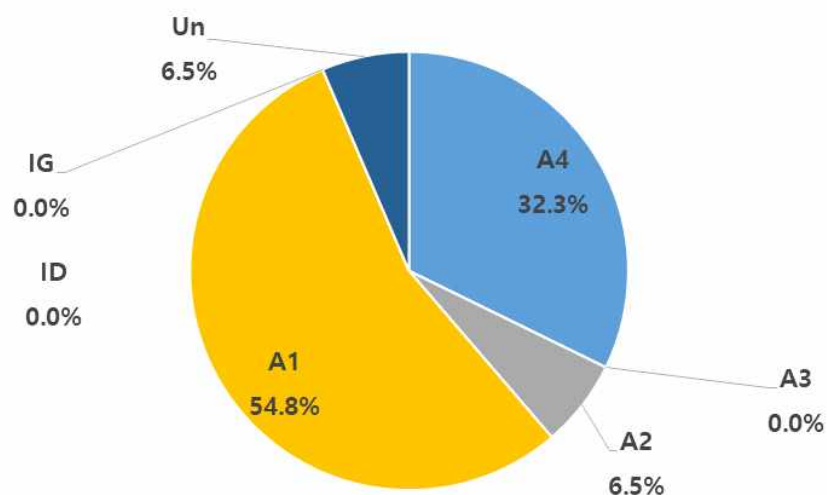
[표 4-6]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 5번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. 5번 문항에서는 마찰력의 식별, 즉 상호작용 기술자의 식별이 모형구성에 있어 핵심적인 문항이다. 문항에서 마찰력을 명시적으로 제시하지 않았으므로 참여자들은 외력이 작용함에도 일정한 속도로 움직이고 있다는 문제 상황을 통해 카트에 작용하는 마찰력을 추론해야 한다. 참여자가 마찰력을 적용하여 상호작용 분면을 구성한다면 앞의 문항에 비해 상대적으로 상태 분면의 구성이 용이한 문항이다. A2 유형으로 분류된 4명의 학생들은 개념 모형으로 등속직선 운동을 선택하여 각 분면을 구성하였는데 이는 마찰력에 대한 타당한 인식이 뒷받침되지 않았거나 등속직선 운동에서의 물체에 작용하는 힘에 대한 오개념(Champagne *et al.*, 1980; Gilbert & Watts, 1988; Halloun & Hestenes, 1985)이 영향을 미친 것으로 해석될 수 있다. 따라서 학생들은 문제에서 명시적으로 제시되지 않은 상호작용을 식별하는데 어려움을 겪었으며 이는 상호작용 분면 구성에 부정적인 영향을 끼친 것으로 해석된다.

[표 4-6] 5번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	3, 25, 32	상호작용 분면에서 물체에 작용하는 알짜힘이 0이라 인지함
	11	상호작용 분면에서 물체에 작용하는 알짜힘이 오른쪽으로 작용한다고 오인하여 나머지 분면을 구성함
A1	30	상태 분면을 구성하지 못함
IG	7, 20, 22, 31	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

6) 6번 문항

6번 문항은 5번 문항과 문제 상황이 거의 유사하지만 카트에 작용하는 계 외부의 상호작용이 복수이며 시간을 매개하지 않고 상태 기술자의 변화를 기술해야 한다는 점에서 차이를 보인다. 6번 문항에서는 처음으로 복수의 상호작용이 작용하는 상황이 다뤄지고 있으므로 참여자들은 모형 구성 과정에서 상호작용 기술자 간의 관계를 고려해야 한다. [그림 4-19]에 6번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다.



[그림 4-19] 6번 문항의 모형구성 유형 분포

6번 문항은 전체에서 A2의 비중은 가장 작고 A1의 비중이 가장 큰 문항이다. 이는 특정 분면을 구성하지 못한 참여자들이 많다는 것을 의미한다. 또한 IG와 ID가 0명인 것으로 보아 대부분의 참여자들이 최소한 개 이상의 분면을 형성한 것으로 이해할 수 있다.

[표 4-7]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 6번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. 결과를 보면 A1 유형의 참여자들은 대부분 상태 분면 구성에 어려움을 겪은 것으로 이해된다. 일반적으로 고등학생들은 등가속도 운동 상황에서 카트의 속도를 시간에 대한 함수로 기술하는데 익숙한 반면, 시간을 매개하지 않고 이동 거리와 속도를 관계 짓는데 어려움을 겪는다(Lim & Lee, 2015). 이러한 어려움이 6번 문항의 상태 분면 구성에서 나타난 것으로 해석된다. 또한 A1 학생들 중에서 일부는 카트에 작용하는 마찰력을 인식했음에도 인과 분면에서 카트의 가속도를 구하는 과정에서 오류를 범한 것으로 나타났다. 이는 문제해결과정에서 외력=알짜력(Alonzo & Steedle, 2009)으로 인식하는 경향이 6번 문항에 관한 모형구성에서도 드러났다고 할 수 있다. 6번 문항도 5번 문항 마찬가지로 역학 분야의 전통적인 오개념이 기술자 식별에 어떤 영향을 끼치는지 대표하는 사례라 할 수 있다. 이를 요약하면 6번 문항의 경우 명시적으로 제시되지 않은 상호작용의 인식과 계에 작용하는 외력과 알짜힘 간의 혼동이 모형구성 과정에서 참여자들이 겪는 핵심적인 어려움으로 파악된다.

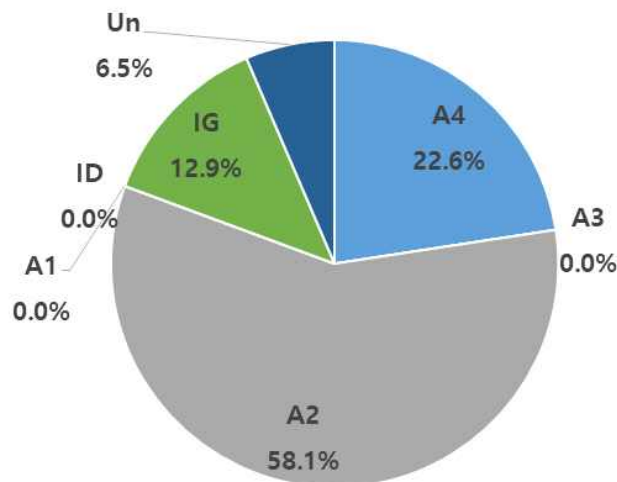
[표 4-7] 6번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	1, 20	상호작용 분면에서 마찰력의 크기를 10N으로 오인하여 인과 분면과 상태 분면을 구성함
	2, 7, 11, 13, 22, 23, 25, 26, 31	상호작용 분면에서 마찰력의 크기를 10N으로 오인하여 인과 분면을 구성함
A1	3, 15, 19, 24, 27, 29, 30, 32	인과 분면과 상호작용 분면은 타당하게 구성했으나 상태 분면을 구성하지 못함
	12	마찰력을 무시하고 철수가 미치는 힘만으로 상호작용 분면을 구성하여 인과 분면을 구성함

7) 7번 문항

7번 문항은 등가속도 운동의 대표적인 예시인 Atwood machine에 대한 것으로 실에 의해 구속된 두 개의 물체가 문제 상황으로 제시된다는 점에서 계의 설정이 모형을 구성하는데 있어 중요한 역할을 하게 된다. 즉, 수레와 추를 하나의 계로 설정할 것인가 아니면 별개의 계로 설정할 것인가에 따라 상호작용과 인과 분면이 다르게 형성된다.

[그림 4-20]에 7번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 7번 문항은 A2의 비율이 높은 문항으로 정답률도 32.3%에 그쳐 고전적인 관점과 모형구성의 측면에서 모두 까다로운 문항임을 알 수 있다. 주목할 만한 부분은 A1 유형이 한 명도 없었다는 점인데 이는 7번 문항의 경우 상호작용과 인과 분면 형성이 까다로운데 반해 상태 분면은 참여자가 별도로 고려할 필요 없이 제시문의 상황을 그대로 받아들이면 되기 때문으로 여겨진다.



[그림 4-20] 7번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-8]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 7번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. 대부분의 A2 유형 참여자들은 상호작용 분면에서는 수레와 추에 작용하는 장력을 인지하지 못하고 추의 중력이 그대

로 수레에 작용한다고 오인하였다. 즉, 장력에 관한 지식이나 개념의 결핍으로 인해 기술자 식별 단계에서 추와 수레 사이의 상호작용을 인식하지 못하고 상호작용 분면을 구성한 것으로 파악된다. 하지만 참여자들이 장력을 사전에 학습하지 못해 정확한 용어와 개념을 모르더라도 추의 가속도가 5 m/s^2 인 초기조건을 이용하면 추에 중력과 반대 방향의 또 다른 힘이 작용해야 함을 유추할 수 있다. 수레와의 상호작용이 추의 운동에 영향을 미친다는 점에서 추는 계 외부에 있는 동인이 아니라 계 내부에 속한 대상이다(Halloun, 2006). 모형의 각 분면 간에는 정합이 이뤄져야 함(Lee & Yoo, 2017)에도 학생들은 문제에서 기술을 요하는 수레에 대해서만 모형을 구성하고 추에 대해서는 모형구성을 시도하지 않았다. 이로 인해 초기 조건과 분면 간에 일관성이 없었음에도 학생들은 이를 인지하지 못했다.

반면, 수레와 추를 하나의 계로 보면 장력은 계 내부에 작용하는 힘이므로 계의 운동에 영향을 미치지 않게 된다. 그러나 이 경우 인과 분면에서 수레와 추를 하나의 계로 설정해야 하는데 A2 유형의 참여자들은 수레만을 계로 설정함으로써 타당한 모형 생성에 실패한 것으로도 해석할 수 있다.

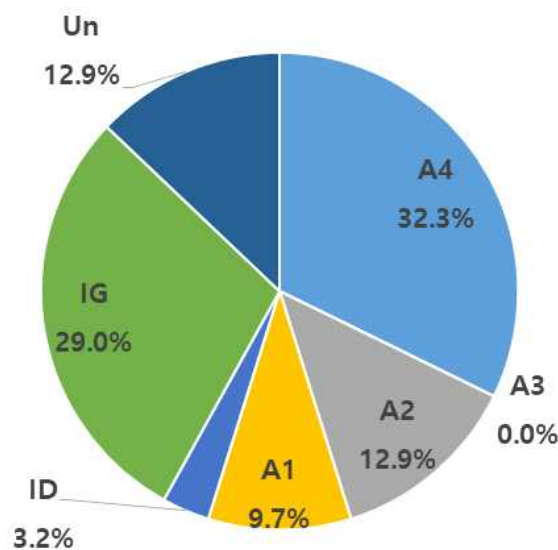
[표 4-8] 7번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	1, 4, 8, 9, 10, 11, 13, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 27, 29, 30, 32	수레와 추를 별도의 계로 설정한 상태에서 추의 중력을 수레의 상호작용으로 오인하고 상호작용과 인과 분면을 구성함
	23	상호작용 분면에서 장력과 추에 작용하는 중력의 크기가 같다고 오함
IG	7, 12, 24, 31	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

8) 8번 문항

8번 문항의 상황은 대체로 7번과 동일하나 수레에 마찰력이 존재한다는 것에서 차이를 보인다. 또한 7번 문항에서는 수레나 추의 운동에 관한 논의를 유도하지 않았으나 8번 문항에서는 추의 속도에 관한 상태 분면을 구성해야 한다는 점도 차별되는 부분이다.

[그림 4-21]에 8번 문항의 모형구성 유형 분포를 나타냈다. 8번 문항에서는 A4, A2의 비중은 작은 편인데 반해 IG의 비중은 거의 30%에 육박한 것으로 보아 참여자들이 모형을 구성하기가 상당히 까다로운 문항으로 나타났다.



[그림 4-21] 8번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-9]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 8번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. A2와 A1 유형 참가자들은 대부분 마찰력을 고려하지 않고 7번 문항과 유사하게 인과 분면을 구성하였다. 이는 참여자들이 마찰력을 식별하지 못했거나 고려하지 않고 상호작용 분면을 구성했기 때문으로 보인다. 일부 참여자는 수와 추를 별개의 계로 설정한 뒤 마찰력을 인과 분면 구성에 적용하지 않았다. 마찰력은 테이블(동인)과

수레(대상)의 상호작용으로 수레만을 계로 설정하면 계 외부의 상호작용이 된다. 그럼에도 일부 참여자들은 마찰력을 포함하지 않고 수레의 인과 분면을 구성하였다. 이는 참여자들이 계의 구성 원리에 대한 명확한 기준을 갖고 있지 않으며 계의 설정을 모형구성 과정에서 일관성 있게 적용하지 못하는 것으로 해석할 수 있다. 또한 상호작용이 작용하는 대상(수레)과 문제 상황에서 기술을 요하는 대상(추)의 불일치로 인해 학생들이 계를 설정하는데 어려움을 겪고 직관이나 추측에 의해 해를 선택한 경우가 많았다. 정리하면, 많은 참여자들이 복수의 대상에 관한 모형을 구성할 때 계 설정에 따라 외부와 내부의 상호작용을 구분하고 이를 일관성 있게 적용하여 하는데 어려움을 겪고 있음을 확인할 수 있었다.

[표 4-9] 8번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

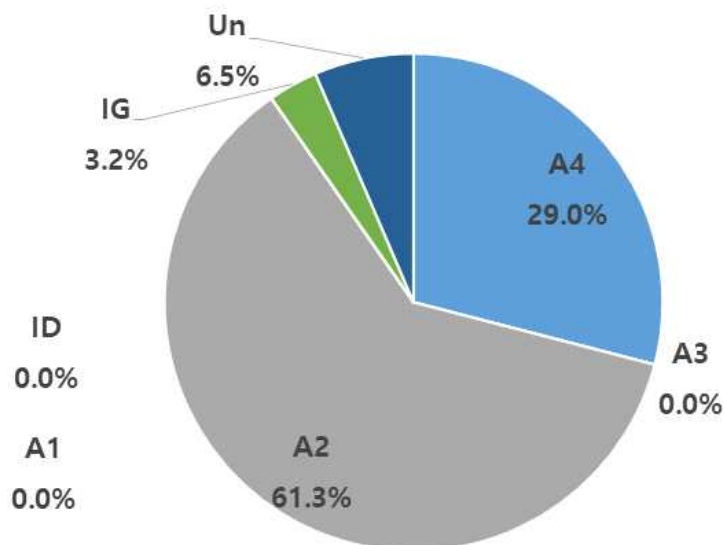
모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	10, 17, 31	마찰력을 고려하지 않고 상호작용 분면과 인과 분면을 구성하여 가속도를 구한 다음 속도에 관한 상태 분면을 구성함
	24	마찰력의 크기를 오인하고 상호작용 분면을 구성함.
A1	13, 20	마찰력을 고려하지 않고 상호작용 분면과 인과 분면을 구성함. 속도에 관한 상태 분면은 구성하지 못함
ID	29	임의적으로 운동 2법칙에 변인을 대입하여 해를 추정함
IG	8, 2, 11, 12, 16, 19, 22, 26, 27, 30	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

9) 9번 문항

9번 문항은 힘개념 검사(Hestenes *et al.*, 1992)의 문제 상황을 차용하여 제작한 것으로 상태 분면보다는 상호작용 분면에 초점이 맞춰진 문항

이다. 5번, 6번 문항과 유사하게 문항의 제시문에서 물체에 작용하는 상호작용을 명시적으로 드러내지 않았으며 참여자들이 물체의 운동 상태를 통해 상호작용을 유추해야 한다.

[그림 4-22]에 9번 문항의 모형구성 유형 분포를 제시하였다. 9번 문항의 모형구성 유형 분포는 매우 독특하다. A2 참여자들이 전체 문항 중에서 가장 비중이 크며 A1로 분류된 참여자는 한 명도 없었다. 이는 9번 문제 상황이 상태보다는 상호작용 기술자 중심으로 기술되기 때문에 상호작용 기술자를 타당하게 식별하면 나머지 분면을 구성하는 것은 그리 어렵지 않았던 것으로 해석된다. ID나 IG 유형은 1명에 불과하여 대부분의 참여자들이 비록 타당하지는 않지만 모든 분면을 형성하는데 성공한 것으로 보인다.



[그림 4-22] 9번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-10]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 9번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. 9번 문항에서 A2 유형의 참여자들은 소형차와 지면 사이의 정지마찰력이 소형차의 구동력임을 인지하지 못한 채 소형차가 트럭을 미는 힘을 트럭과 소형차에 가해지고 있는 외력으로 혼동하

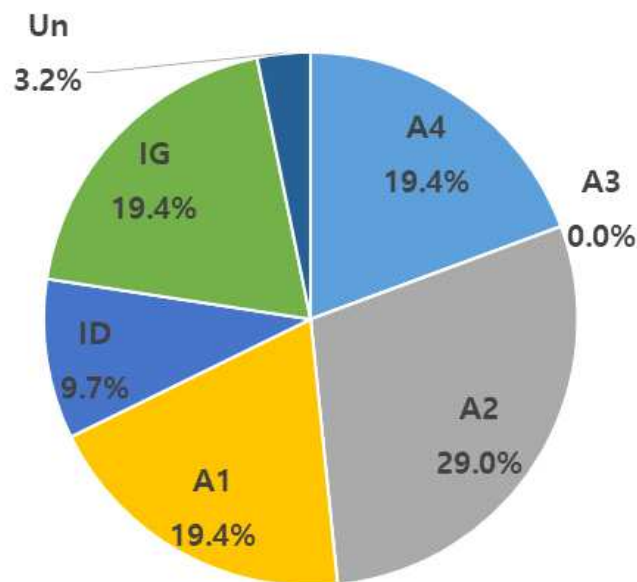
였다. 문항 제시문에서 소형차의 구동력이 지면과의 정지마찰력이라는 점을 명시적으로 표현하지 않았으므로 참여자들은 소형차와 트럭의 운동 상태를 통해 이를 유추했어야 했다. 즉, 소형차가 트럭을 미는 힘은 소형차와 트럭 간의 상호작용이므로 소형차는 외부 동인과의 상호작용이 존재해야만 소형차와 트럭이 함께 가속 운동을 할 수 있다. 여기서의 동인은 바로 지면과의 마찰력이다. 물리 I 에서 자동차의 구동 원리를 다루지 않았기에 참여자들에게 이러한 접근은 쉽지 않은 일이다. 그러나 구동력에 관한 구체적인 지식이나 개념이 없다하더라도 알짜힘 혹은 작용 반작용과 같은 상호작용 기술자 간의 관계를 통해 인과 분면의 구성은 가능하다. 그러나 많은 참여자들이 상호작용에 관한 개념 세계의 요소들을 활용하여 타당한 모형 생성에 성공하지 못하였다. 9번 문항에서 참여자들은 힘이란 물리적 실체간의 상호작용임을 명확히 이해하지 못하고 있으며 명시적으로 제시하지 않은 상호작용을 식별하고 모형을 구성하는데 어려움을 겪고 있음을 확인하였다.

[표 4-10] 9번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	10, 17, 31	마찰력을 고려하지 않고 상호작용 분면과 인과 분면을 구성하여 가속도를 구한 다음 속도에 관한 상태 분면을 구성함
	24	마찰력의 크기를 오인하고 상호작용 분면을 구성함.
A1	13, 20	마찰력을 고려하지 않고 상호작용 분면과 인과 분면을 구성함. 속도에 관한 상태 분면은 구성하지 못함
ID	29	임의적으로 운동2법칙에 변인을 대입하여 해를 추정함
IG	8, 2, 11, 12, 16, 19, 22, 26, 27, 30	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함
10) 10번 문항		

10번 문항은 줄로 연결된 두 대상이 일정한 속도로 움직이고 있는 상태에서 서로를 잡아당기는 상황이다. 두 대상 간의 상호작용은 계 내부의 힘이므로 계의 운동 상태에 영향을 주지 않는다. 따라서 두 대상을 하나의 계로 설정하면 관성기준계로 볼 수 있으므로 대상들의 초기 상태를 지면을 기준으로 정지한 상태로 전환하여 모형을 구성해도 무방하다. 또한 문항의 제시문에서는 한 대상이 일방적으로 다른 대상을 잡아당기는 것으로 묘사되었으나 참여자들은 작용반작용을 통해 두 대상에게 모두 장력이 작용하고 있음을 인지해야 한다.

[그림 4-23]에 10번 문항의 모형구성 유형 분포를 제시하였다. 10번 문항은 전체 문항 중에서 3번 문항 다음으로 A4의 비율이 낮은 문항으로 특정 유형에 학생들이 쏠려 있지 않고 고른 분포를 보이고 있다. 또한 정답률이 22.6%로 전체 문항에서 가장 어려운 문항으로 나타났다.



[그림 4-23] 10번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-11]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 10번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. A2 유형의 참여자들은 영희가 철수를 당기는 힘의 반작용을 인식하지 않고 철수만 영희에게 끌려오는 것으로 문제

상황을 이해하여 모형을 생성하였다. 작용반작용에 대한 개념을 문제 상황에 투사하여 영희에 작용하는 상호작용을 식별하지 못하고 소박한 직관에 의거하여 문제 상황의 기술자를 인식한 것으로 보인다. 또한 두 대상이 등속직선 운동하고 있는 상태에서 상호작용을 하고 있다는 점도 참여자들의 상태 분면 형성의 어려움을 가중시켰다. 두 대상을 하나의 계로 본다면 계 내부에서 대상간의 상대적은 운동은 계 전체의 운동에 영향을 주지 않기 때문에 영희와 철수의 초기 운동 상태는 상태 분면 구성에 영향을 주지 않을 수 있다. 그러나 이러한 계의 운동에 관한 적절한 이해가 뒷받침되지 않는다면 이는 문제 상황을 복잡하게 인식하는 원인이 된다. 결론적으로 10번 문항은 상호작용 기술자에 대한 부적절한 인식과 운동 상태의 복잡성, 복수의 대상에 대한 기술 등의 요인으로 인해 학생들이 타당한 모형을 구성하는데 어려움을 겪은 것으로 해석할 수 있다.

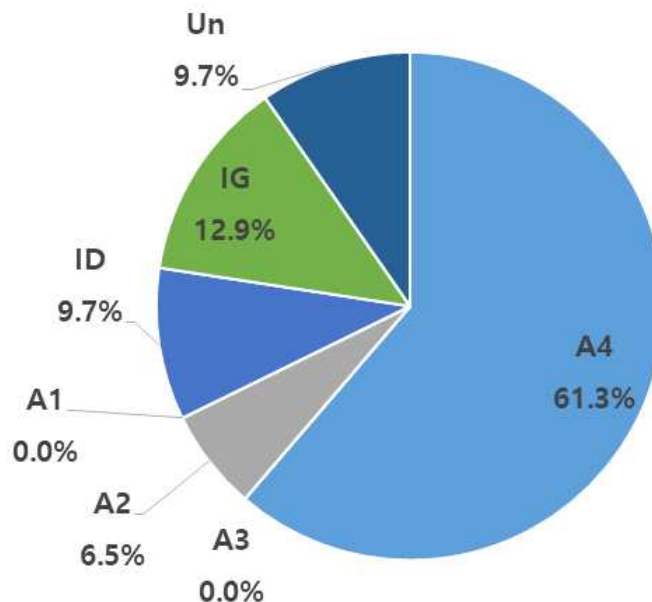
[표 4-11] 10번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	1, 4, 10, 13, 21, 23, 25	영희에게 작용하는 알짜힘이 0이라고 오인하고 철수에 대한 분면만을 구성함
	24	계 내부의 상호작용을 외부의 상호작용으로 오인하여 인과 분면과 상태 분면을 구성함
	20	영희의 인과 분면만을 구성하였으며 두 사람 간의 상대 속도를 고려하지 않고 상태 분면을 구성함
A1	9, 27, 30	상호작용 분면과 인과 분면은 적절하게 구성했으나 상태 분면을 구성하지 못함
	11, 18	영희와 철수의 상호작용으로 계 전체의 인과 분면을 구성하였으며, 상태 분면은 구성하지 못함
	31	철수에 대한 상호작용과 인과 분면만을 구성하고 상태 분면은 구성하지 못함
ID	19, 29	충격에 의한 운동 모형에 임의로 변입을 대입하여 나온 결과를 해로 간주
	32	두 물체의 이동 거리를 임의적인 방법으로 구하여 가장 근접한 보기를 선택함
IG	8, 15, 22, 26	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

11) 11번 문항

11번 문항은 이전 문항들과 달리 대상의 운동 상태가 등속이나 등가속도 운동이 아니라 가속도가 일정하게 변하는 운동으로 제시되어 있다. 즉, 11번 문항의 모형을 구성하기 위해서는 등가속도나 등속직선 운동 모형 대신에 충격에 의한 운동 모형이 선택되어야 한다. 개념 모형의 선택이 적절하게 이뤄졌다면 상태 분면은 방향을 고려한 운동량의 변화량으로 표현되게 된다. 즉, 11번 문항에 대한 모형구성의 핵심은 문제 상황의 특정 유형 즉, 가속도 운동 상황에 대한 인지를 바탕으로 충격에 의한 운동 모형을 선택하는 단계라 할 수 있다.

[그림 4-24]에 11번 문항의 모형구성 유형 분포를 제시하였다. 11번 문항은 상대적으로 A2의 비율이 낮고 IG와 ID의 비율은 높은 것으로 나타났다. 이는 적절한 개념 모형을 선택한 참여자들의 대부분은 타당한 모형을 생성하였으나 그렇지 못한 참여자들은 하나의 분면도 구성하기 버거워한 것으로 해석할 수 있다.



[그림 4-24] 11번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-12]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 11번 문항 모형구성에서

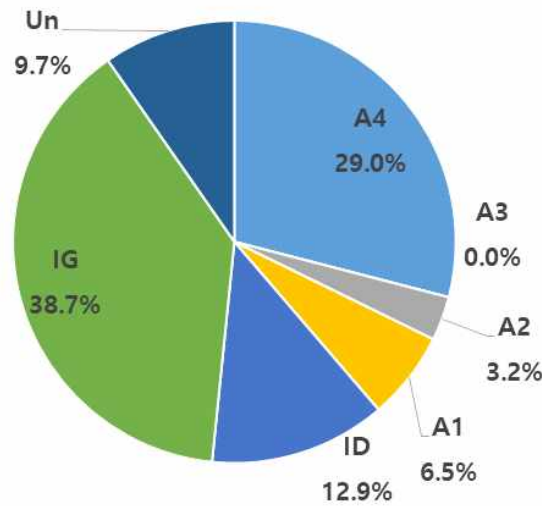
겪은 어려움을 기술하였다. A2 유형의 참여자들은 적합한 개념 모형을 선택했음에도 운동량의 변화량을 구하는 과정에서 방향에 따른 부호의 설정에서 어려움을 노출하였다. ID 유형의 참여자들은 문제 상황에 대한 숙고 없이 익숙한 등가속도 운동 모형을 적용하여 모형을 구성하고자 한 것으로 나타났다. 이는 Halloun(2006)이 지적한 바와 같이 ID나 IG 유형의 참여자들은 선택한 개념 모형과 문제 상황간의 동형성(isomorphism)에 대한 충분한 숙고가 없었거나 충격에 의한 운동 모형에 대한 지식이나 이해가 현저히 부족한 것으로 해석할 수 있다.

[표 4-12] 11번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	11, 18	상태 분면에서 운동량을 구하는데 있어 벡터의 방향이 적절하지 않음
ID	23, 24, 25	운동 2법칙에 임의로 변인을 대입하여 해를 구함
IG	20, 22, 26, 30, 23, 24, 25	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

12) 12번 문항

12번 문항은 11번 문항과 마찬가지로 가속도가 일정하지 않은 물체의 운동을 다루고 있으나 대상에 브레이크가 작동하기 전까지는 자유 낙하에 의한 등가속도 운동을 한다는 점에서 복합적인 운동 상황으로 설계되어 있다. 따라서 12번 문항의 모형을 구성하기 위해서 복수의 개념 모형을 선택해야 하므로 12번 문항은 전체 문항 중에서 모형구성이 가장 복잡한 문항이라 할 수 있다. 이러한 문제 상황의 복잡성과 난해함으로 인해 12번 문항은 전체 문항 중에서 A4+A3+A2의 비율이 가장 낮으며 ID+IG의 비율은 가장 높게 나타났다[그림 4-25].



[그림 4-25] 12번 문항의 모형구성 유형 분포

[표 4-13]에 A4 유형을 제외한 참여자들이 12번 문항 모형구성에서 겪은 어려움을 기술하였다. ID로 분류된 참여자 대부분은 등가속도 운동 모형과 운동량-충격량 모형을 시간에 따라서 구분하여 적용하지 않고 임의적으로 혼용하여 변입을 대입하였다. 또한 IG에 해당되는 학생들의 대다수도 11번 문항에서의 동료교수를 통해 그래프의 면적이 충격량이라는 지식은 접했으나 충격량과 운동량 사이의 개념적 관계에 대해서는 충분한 이해에 도달하지 못해 모형을 생성하지 못한 것으로 보인다. 결과적으로 가속도 운동이라는 다소 익숙하지 않은 상황과 더불어 특정 사건을 기준으로 다른 개념 모형을 선택해야 한다는 점들로 인해 학생들이 분면 구성에 어려움을 겪은 것으로 해석된다.

[표 4-13] 12번 문항의 모형구성에서 참여자들이 겪은 어려움

모형구성 유형	참여자	모형 구성에서 겪는 어려움
A2	21	상호작용 분면에서 알짜힘에 의한 충격량을 타당하게 구성하지 못함
A1	17	충격량을 계산하여 속도의 변화량을 구했으나 등가속도 운동 구간에 대한 상태 분면을 구성하지 못함
	25	인과 분면 즉, 알짜힘에 의한 충격량만 계산함
ID	23, 27, 29	충격량과 등가속도 운동 관련 공식에 변인을 대입한 결과를 임의적으로 조합하여 해를 구함
	28	문제에서 주어진 그래프를 임의적으로 적분하여 물체가 낙하한 거리를 구하고자 하였음
IG	7, 11, 13, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 30, 31, 32	보기 중의 하나를 직관적으로 선택함

앞에서의 논의 중에서 모형구성에서 학생들의 어려움에 해당되는 내용만을 [표 4-14]에 요약하였다.

[표 4-14] 각 문항별 모형구성의 어려움

문 항	모형구성 유형 (빈도별 상위 4개)	문항별 모형구성의 어려움
1	A4 52%	·참여자들이 등가속도 운동과 관련된 개념 세계를 적절하게 상기하지 못해 개념 모형의 선택이나 상태 분면 구성에 어려움을 겪음
	IG 19%	
	A1 13%	
	Un 10%	
2	A4 42%	·A2와 A1 유형의 참여자들은 주로 상태 분면에서 서로 다른 유형의 운동을 하는 두 물체의 상태를 하나의 좌표계에서 표현하는데 있어 어려움을 겪음
	A2 29%	
	A1 13%	
	IG 7%	
3	A2 55%	·대부분의 A2는 문제에서 기술하기를 요구하는 운동 시점을 다른 시점과 혼동하여 상태 분면을 구성함
	A4 16%	
	A1 13%	
	IG 7%	

4	A4	55%	·A2로 분류된 대부분의 참여자들은 벽까지의 거리를 자동차가 이동한 거리를 오인하여 상태 분면을 구성
	A2	16%	
	IG	13%	
	A1	7%	
5	A4	65%	·A2와 A1 참여자들은 등속 운동하는 물체에 대한 오개념 혹은 마찰력에 관한 지식 부족으로 인해 상호작용 기술자를 타당하게 인식하지 못함. 이로 인해 등가속도 운동 모형을 개념 모형을 선택하지 못하였으며 모형 생성에 어려움을 겪음
	A2	13%	
	IG	13%	
	Un	6%	
6	A1	58%	·A1의 비율이 가장 높게 나타난 문항으로 대부분의 참여자들이 상태 분면을 구성하지 못함 ·A2와 A1에 속한 많은 참여자들이 마찰력을 고려하지 않고 철수가 카트를 미는 힘을 알짜힘으로 오인함 ·A1 참여자들은 상태 분면에서 시간을 매개하지 않고 이동거리와 속도를 관련짓는데 어려움을 나타냄
	A4	29%	
	A2	7%	
	Un	6%	
7	A2	58%	·A2 참여자들의 대부분 상호작용 분면에서는 수레와 추에 작용하는 장력을 인지하지 못하고 추의 중력을 수레에 작용하는 상호작용으로 오인함 ·위 어려움은 계의 설정이 기술자 식별부터 모형 생성에 이르기까지 일관성 있게 유지되지 못함으로 해석할 수도 있음
	A4	23%	
	IG	13%	
	Un	6%	
8	A4	32%	·A2와 A1에 속한 참여자들은 상호작용 기술자(마찰력)에 대한 타당한 기술없이 7번 문항의 모형을 수정하지 않고 차용하여 모형을 생성함. ·마찰력이 작용하는 대상과 문제 상황에서 기술을 요하는 대상의 불일치로 인해 참여자들이 모형을 구성에서 어려움을 겪고 직관이나 추측에 의해 해를 선택함 ·복수의 대상에 관한 모형을 구성할 때 계 설정에 따라 외부와 내부의 상호작용을 구분하고 이를 일관성 있게 적용하여 하는데 어려움을 겪고 있음
	IG	29%	
	A2	13%	
	Uni	13%	
9	A2	61%	·상태 분면에 관한 수학적 조작이 없어 상태 분면 구성에 관한 어려움을 관찰되지 않음 ·A2에 속한 참여자들의 대부분은 대상과 동인의 구분을 통한 계의 설정과 어떤 상호작용을 인과 분면에 적용할 지에 대해서 어려움을 느낌 ·명시적으로 제시하지 않은 자동차의 타이어와 도로 사이의 정지 마찰력에 대해서 인지한 참여자가 거의 없음
	A4	29%	
	Un	7%	
	IG	3%	
10	A2	29%	·A2 참여자들은 영희가 철수를 당기는 힘의 반작용을 철수만 영희에게 끌려오는 것으로 문제 상황을 기술하여 분
	A4	20%	

11	A1	19%	면을 구성
	IG	19%	·A1 유형의 참여자들은 상태 분면 구성에서 두 대상의 운동을 한 좌표계에서 기술하는데 어려움을 겪음
	A4	61%	·가속도 운동 상황에 적합한 개념 모형을 선택하지 못한
	IG	13%	참여자들의 비율이 높음
	ID	10%	·충격량-운동량 개념 모형을 선택한 참여자들은 대부분
12	Un	10%	모형 분면을 타당하게 구성함
	IG	39%	·복합적인 운동 상황을 기술하기 위해 2개의 개념 모형을
	A4	29%	선택해야 하나 많은 참여자들이 그 중 한 개만을 선택함
	ID	13%	·IG나 ID 유형의 참여자들은 두 개념 모형을 적용하는
	Un	10%	시점의 상태 기술자 식별이 명확히 구분되지 않아 임의적인 방식으로 두 개념 모형을 혼용함

모형구성에 관한 참여자들의 어려움을 모형구성의 각 단계를 중심으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

기술자 식별에서 참여자들의 어려움은 크게 두 가지 측면으로 나타났다. 첫 번째는 문제 상황에 대한 오인이다. 문제의 제시문을 주의 깊게 읽지 않아 문제 상황의 특정 조건이나(6번) 기술해야 하는 대상의 운동 시점 혹은 거리(3번, 4번)등을 오인하였다. 두 번째 측면은 상호작용 기술자의 인식이다. 특히 명시적으로 상호작용 기술자를 제시하지 않은 문항에서 참여자들은 대상의 운동 상태나 초기 조건 등을 이용하여 상호작용 기술자를 인식해야 한다(5번, 6번, 7번, 9번). 이때 전통적인 오개념이 상호작용 기술자 식별에 중요 장애로 작용하여 상호작용 분면 구성에 직접적인 영향을 끼친 것으로 나타났다. 이 경우 참여자들은 상태 기술자에 대한 인과적인 분석을 통해 상호작용 기술자를 추론하기 보다는 상태와 상호작용을 혼동하거나 상호작용이 존재하지 않는 것으로 간주하기도 하였다. 또한 대상 간에 상호작용이 있는 경우 한 대상에게만 힘이 작용한다고 인식하는 경우도 관찰되었다(10번).

일부 참여자들은 개념 모형을 선택할 때 문제 상황과 개념 모형간의 동질성(isomorphism)에 대한 충분한 숙고 없이 익숙한 개념 모형을 선택하는 경우가 관찰되었다(11번, 12번). 이는 참여자들이 대상 혹은 계의

기술자가 개념 모형 선택의 중요한 기준임을 이해하지 못했거나 개념 모형에 관한 이해와 지식이 충분하지 못했던 것으로 해석할 수 있다.

모형 생성 단계에서 참여자들은 계의 설정, 즉 대상과 동인의 구분에 대한 명확한 기준을 갖고 있지 않아 어떤 상호작용 기술자를 인과 분면 구성에 적용할 것인가에 대해 혼란스러워했다(7번, 8번, 9번, 10번). 또한 기술자 식별부터 모형 생성 단계에 이르기까지 계의 구성을 일관성 있게 유지하지 않고 각 단계마다 계의 설정을 달리 하는 모습도 확인할 수 있었다.

모형 생성 단계의 또 다른 어려움은 상태 분면이었다. 이는 다른 분면들에 비해 상태 분면은 구성하는 과정에서 요구되는 개념 도식이 많기 때문으로 보인다. 또한 연구 참여자들은 문제 상황에서 복수의 대상이 존재하거나 문제 상황의 특정 유형이 복합적일 때 상태 분면의 구성을 어려워하는 것으로 나타났다. 운동 상태가 다른 두 물체 간의 거리를 한 좌표축계에서 표현하거나(2번, 10번), 복수의 대상에 대한 모형을 필요로 하거나(7번, 8번), 대상의 운동 상황이 복합적일 때(3번)일 때 A2, A1 유형의 참여자들은 상태 분면 구성에서 어려움을 겪었다.

타당화 단계에서는 참여자들은 자신의 해가 보기에 있는지 여부가 모형의 타당성을 평가하는데 일차적인 기준임을 확인하였다. 3번, 7번, 9번, 10번 문항의 경우 A2 유형이 비율이 유독 높게 나타났는데 이는 타당하지 않은 모형의 해가 보기에 있으면 연구 참여자들은 생성된 모형이 타당하다고 판단한 것으로 해석할 수 있다. 자신들의 해가 보기에 없는 경우 연구 참여자들은 자신의 모형을 포기하고 적당해 보이는 보기를 임의로 선택하거나 모형을 재검토하여 수정하였다.

4.2. 소집단 상호작용의 양상

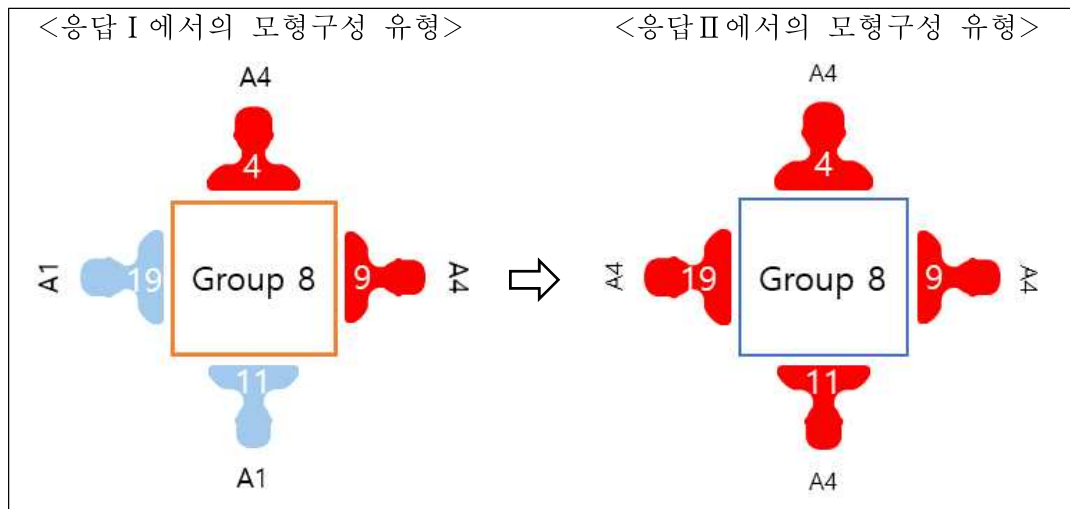
이 절에서는 문제해결에 관한 동료교수에서 모둠원들이 상호작용하는 양상을 모둠 내 대응된 모형의 수, 참여자들의 역할, 선택된 개념 모형의 동질성, 모형의 변화 등을 기준으로 범주화하였다. 그 결과 참여자들의 소집단 상호작용은 튜터링, 경쟁, 협업, 양립성 확인의 4가지 양상으로 분류되었다. 그리고 전체 문항에 대한 소집단 상호작용 양상의 빈도를 제시하고 비슷한 분포를 보이는 문항들의 특징을 분석하였다.

4.2.1. 소집단 상호작용의 양상 분류

참여자들은 응답 I 이 끝나면 교사가 지정한 모둠으로 이동하여 모둠원들과 동료 토론을 수행하였다. 이때 참여자들이 나눈 담화와 활동지, 제출한 답안 등을 분석하여 참여자들의 소집단 상호작용을 다음과 같이 튜터링, 경쟁, 협업, 양립성 확인의 네 가지 양상으로 분류하였다.

1) 튜터링

본 연구에서 가장 많이 관찰된 상호작용은 교수자(tutor) 역할을 맡은 참여자가 주로 설명을 하며 상호작용을 주도하는 형태였다. 피교수자(tutee)는 교수자의 모형이 타당함을 암묵적으로 혹은 명시적으로 판단한 뒤 그들의 모형을 수용한다. 이러한 양상이 관찰된 6번 문항 8조에서의 참여자들의 모형구성 유형의 변화를 [그림 4-26]에 나타냈다. 붉은 색은 정답을 하늘색은 오답을 의미한다.



[그림 4-26] 6번 문항 8조의 모형구성 유형 변화(튜터링)

응답 I에서 대응된 모형을 구성한 참여자는 S4, S9로 이들은 타당한 모형을 구성하여 정확한 해를 구하였다. 반면 S11, S19는 A1 유형으로 일부 분면만을 구성하였으며 정확한 해를 구하지 못하였다. 이들 중 모듬의 소집단 상호작용을 주도한 것은 S4와 S19였다. 다음은 6번 문항 8조에 관한 참여자들의 담화이다.

S19: D야? 어떻게 나왔냐?

S4 : 그니까 아까 전 상황이 마찰력이 5N 있었잖아. 근데 지금 10N으로 증가했잖아. 그럼 5N(마찰력)이 미치는 건 있어. 그럼 아까처럼 계산해보면은 가속도 $1/4$ 나오는 거 맞고, $1/4$ 로 밀면 이 그래프가(본인 학습지를 가리키며) 나오잖아. 근데 이만큼 8m를 이동했잖아. 8m를 이동했을 때 속도를 구해야 돼. 그래서 이거 사다리꼴 공식 쓰면 좀 XX같이 나오거든? 여기서 근의 공식 써가지고 하면은 이렇게 나와. 이제 이 식에 대입해주면? 이제 더 깔끔하게 나와

S19: (끄덕끄덕) 사다리꼴에서? v-t 그래프에서 그렇게 한 거야?

S4 : 어 v-t 그래프

S19: 처음속도 뭐로 잡아놨냐?

S4 : 1. 처음에 1m/s였잖아.

S19: 아아~ 1m/s로 이동.

S4 : 응

S19: (9번 학습지를 보며)어떻게 했냐?

S9: (4번을 가리키며) 나도 똑같아 애랑...가속도 구해서 v-t 그래프

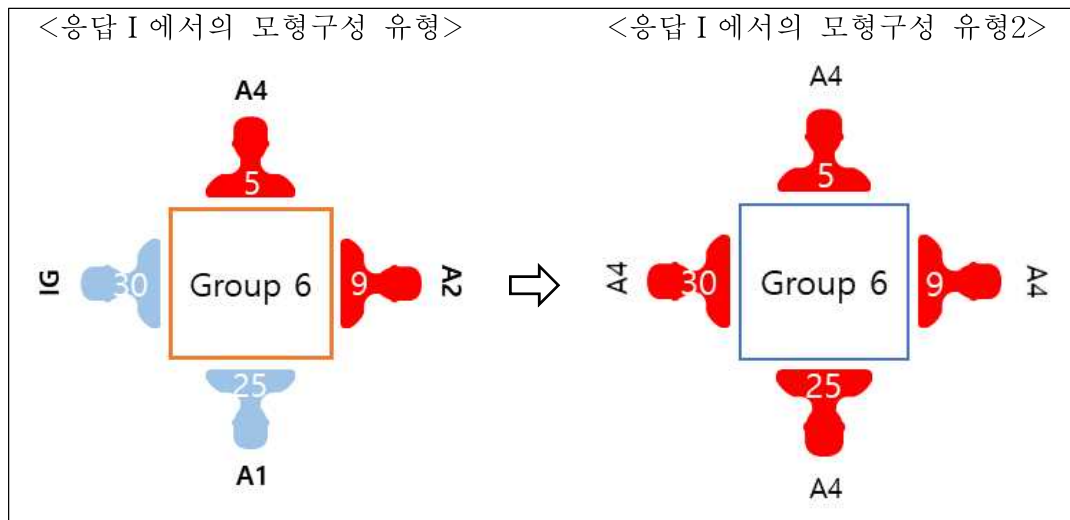
(잠시 후)

S19: 아~ $\sqrt{5} m/s$ 딱 나오네.

대응된 모형을 구성하지 못한 S19는 담화 초기에 대응된 모형을 구성했다고 짐작되는 S4에게 설명을 요구하고 있다. S4는 담화 내내 교수자의 입장에서 피교수자인 S19에게 자신의 모형을 설명하고 있다. 본 연구에서는 참여자들이 교수자와 피교수자의 역할을 수행하며 교수자로부터 피교수자에게 일방적인 모형의 전수가 일어나는 소집단 상호작용을 튜터링으로 분류하였다. 튜터링에서 참여자들의 역할은 고정적이며 동등하지 않다는 특성(Damon & Phelps, 1989)을 보이고 있다.

2) 경쟁

대응된 모형을 가진 참여자가 모둠 내에서 복수일 때 모둠원들은 어떤 모형이 가장 적합한 것인가에 대해 평가를 실시한다. 먼저 대응된 모형을 구성한 참여자들이 자신의 모형을 설명하면 모둠원들은 각자의 방식대로 서로의 모형을 비교, 평가를 실시한다. 평가 결과가 일치하면 모둠원들은 가장 적합하다고 판단된 모형으로 합의를 한다. 만약 평가 결과가 일치하지 않는다면 모둠원은 각기 다른 모형을 고수하게 된다. 이러한 유형이 관찰된 3번 문항 6조에서의 참여자들의 모형구성 유형의 변화를 [그림 4-27]에 나타냈다.



[그림 4-27] 3번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(경쟁-합의)

이 모둠에서 대응된 모형을 가진 참여자는 S5와 S9이다. 이 둘 모두 정답을 선택하기는 했으나 타당한 모형을 구성한 이는 S5였다. 이 모듬의 담화 초반부에서 S5와 S9의 모형에 대한 비교와 평가가 이뤄졌다.

S5: 그니까 브레이크를 밟을 때 $10m/s^2$ 만큼 감소. 가속도 그래프를 그렸어. $10m/s$ 가 되려면 2초 필요하지. $10m/s$ 로 지나가려면. 그럼 그때 넓이가 이 넓이 이 사다리꼴 넓이가 40이야. 그니까 브레이크를 밟아서 $10m/s$ 까지 감소를 하는데 40m를 가야 돼. 그니까 100m지 원래 길이가. 100에 40을 빼. 그럼 60m를 그냥 가도 된다는 거 아니야? .30m/s 지 원래 속도가... 30인데 60m를 가려면 2초 동안은 그냥 가도 된다는 거야. 2초 동안은 그냥 보고 있어도 돼

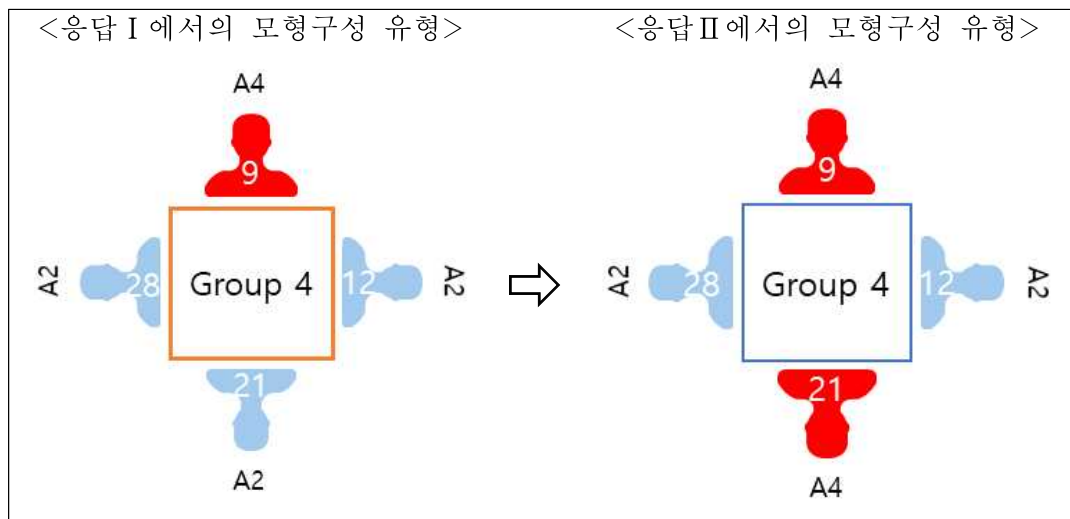
S9: (학습지를 보며)그냥 속력이 이렇게 지날 때 $10m/s$ 가 되면 되니까. 1초에 10씩 떨어지니까 2초 전에만 밟으면 $10m/s$ 로 지나가는 거 아니야? 굳이 이거 전 길이를 계산을 해야 돼?

S5: 뭘 소리야?

S9: 그니까 어차피 초당 10씩 떨어지잖아. 속력이 근데. 이 전체 조건이 그냥 이거 지날 때 $10m/s$ 만 지나면 통과잖아. 그니까

어차피 2초 전에만 하면은 뒤에 거리는 상관없는 거 아니야?
 (중략)
 S5: 근데 네가 말한 대로 하면...
 S9: 나는 이것을 도착하기 몇초 전에 밟아야 되는 지로 잘못 썼어.
 S5: 아~ 그거 아니지 않아?
 S9: 원래 이거 100m에서 해야 되는데 어찌다가 답은 맞았는데... 문제 이해를 잘못된 거 같아.

위 담화는 S5와 S9가 각자의 모형을 제시하고 비교하는 과정을 보여주고 있다. 비교 과정이 끝나고 S9는 자신이 구성한 상태 분면의 문제점을 발견하고는 S5의 모형이 타당하다고 합의하였다. 본 연구에서는 상이한 모형을 구성한 참여자들이 각자의 모형을 비교, 평가하여 적합하다고 여겨지는 모형을 선택하는 양상을 경쟁으로 분류하였다. 모형의 선택은 위 사례와 같이 더욱 타당하다고 판단되는 모형으로 합의가 이뤄질 수도 있지만 그렇지 않을 수도 있다. [그림 4-28]은 합의에 도달하지 못한 채 각자 다른 모형을 선택한 9번 문항 4조의 모형구성 유형의 변화이다.



[그림 4-28] 9번 문항 4조의 모형구성 유형 변화(경쟁-고수)

이 모듈의 모든 참여자들은 대응된 모형을 구성한 상태로 담화를 시작

하였다. 담화를 시작하기 전 타당한 모형을 구성한 참여자는 S9였다.

S9 : $F=ma$ 로 따지고 애(소형차)는 가속도가 5니까 5000N이지?
애(트럭)는 10,000N이고. 근데 애(트럭)는 힘이 없잖아. 애
(소형차)가 애(트럭)를 밀어주는 거잖아. 밀어주는 힘이
10,000N이니까. 작용반작용에 의해서 반대쪽 힘도 10,000N.
그래가지고.

S28: 근데 왜 나는 애초에 그냥 차가 이렇게 운동하니까. 애(소형
차)가 처음에 15,000N, 15,000N의 힘을 줘가지고 이렇게 움
직이는 거니까. 트럭도 애(소형차)를 15000N을 밀어서 움
직이는 줄 알았어. 아닌가?

S12: 그렇게 따지는 거 아니야?

S21: 아니야. 아니야.

S28: 그러니까 처음에 트럭을 밀 때 애(소형차)가 가속도를 많이
줘가지고 15000N의 힘으로 미니까.

S9 : 근데 15,000N을 미는 거는. 밀고 반대가 아니라 앞으로 이동
을 하는 거 아니야?

S21: 그니까 이거 질량만 F 를 나눠서 가지니까 애(소형차) 알짜
힘이 5,000N이고 애 알짜힘이 10,000N 이니깐.

S12: 나는 상쇄되어서 5,000N인 것 같은데.

S21: 어, C(10,000N)같은데? 애(소형차)가 처음에 15,000N으로 밀
었는데. 애(트럭) 알짜힘이 이것만 남은 거니까. 이쪽으로
애(트럭)가 10,000N을, 10,000N쪽으로 힘을 밀었을 거니까.
10,000N 같은데?

(중략).

S21: 난 아무리 봐도 C같은데?

S12: 난 너무 B같은데.

S28: 난 아무리 봐도 D야. 맞아 이게. 15000으로 미니까 같이 이
렇게 딱 가는 거지

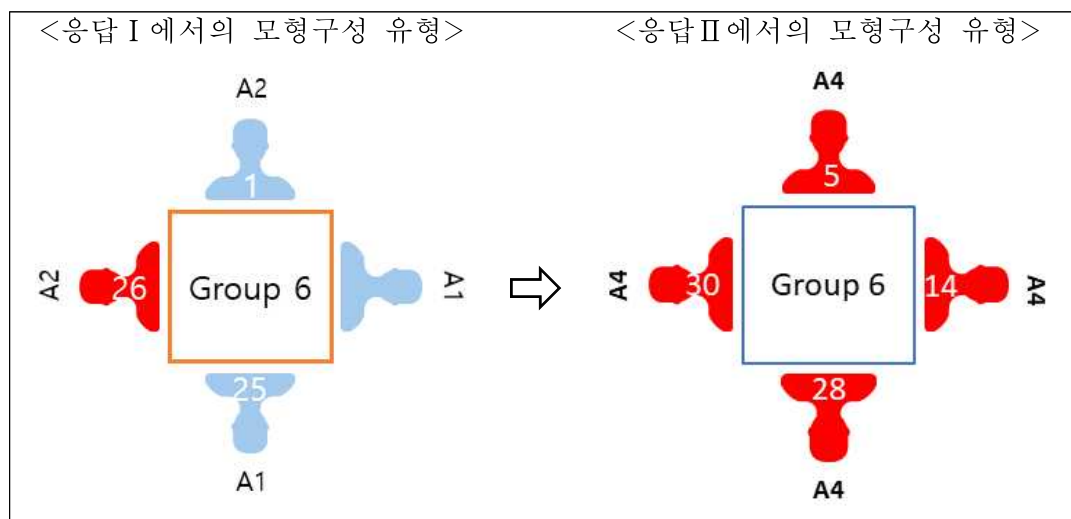
9번 문항 4조의 참여자들은 이전 사례와 달리 끝내 어떤 모듈원의 모
형이 적합한지에 합의하지 않았다. S21은 S9의 모형이 타당하다고 생각

하고 선택하였으나 다른 이들은 수레와 트럭의 상호작용에 대한 이견을 좁히지 못하고 각자의 모형을 끝까지 고수하고 있다.

이처럼 경쟁은 서로 다른 모형을 생성한 참여자들이 각자 대등한 위치에서 상호작용에 능동적으로 참여하는 특징이 관찰된다.

3) 협업

모둠원 중 대응된 모형을 구성한 참여자가 없거나 대응된 모형이 기각된 경우에 참여자들은 공동으로 모형을 수정하거나 새로운 모형의 구성을 시도한다. [그림 4-29]은 이러한 유형이 관찰된 6번 문항 6조의 모형 구성 유형의 변화이다.



[그림 4-29] 6번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(협업)

이 모듬의 S26은 정답을 선택하였으나 임의적으로 답을 선택한 결과였으며 대응된 모형을 구성한 참여자는 없었다.

S26: 나 $\sqrt{8}m/s$ 나왔는데. 찍었다니깐. 나 풀었는데 풀 때마다 $\sqrt{8}m/s$ 나와.

S25: 가속도 $0.5m/s^2$ 맞지 않나...?

S23: 그러면 가속도가 일단 $0.5m/s^2$ 이고

S26: $0.5m/s^2$ 인데 내가 그래프를 그렸거든?

S23: 나도 그렇게 했어.

(중략)

S23: 그니까 $4\sqrt{2}$ 나왔어. 난 t 가.

S26: 그니까 $4\sqrt{2}$ 가. 나도 나와 가지고. v 가 $2\sqrt{2}m/s$ 나왔어.

S23: 거기까지는 우리가 틀린 건 아닌 거 같아.

S26: 거기에서 틀렸으니까 틀린 거 아닐까?

S23: 아니지 이걸 맞는데 우리가 뭘 잘못된 거지.

(중략)

S23: 설마 이거냐?(활동지를 가리키며) 설마 이게 포인트는 아니겠지?

S25: 아 근데 이거(힘) 증가시키니까. 여기서 10N이라고 했으니까 똑같으니까 딱 가는 거 아닌가? 가속도가 $0.5m/s^2$ 인데.

S23: 아 5번 문제 초기 상황이었네 이게..(학습지를 넘기며)이거 이거...

S1 : 아 E번 나온다..마찰력 계산하면 E번 나와.

S25: 답이 무엇으로 나왔어?

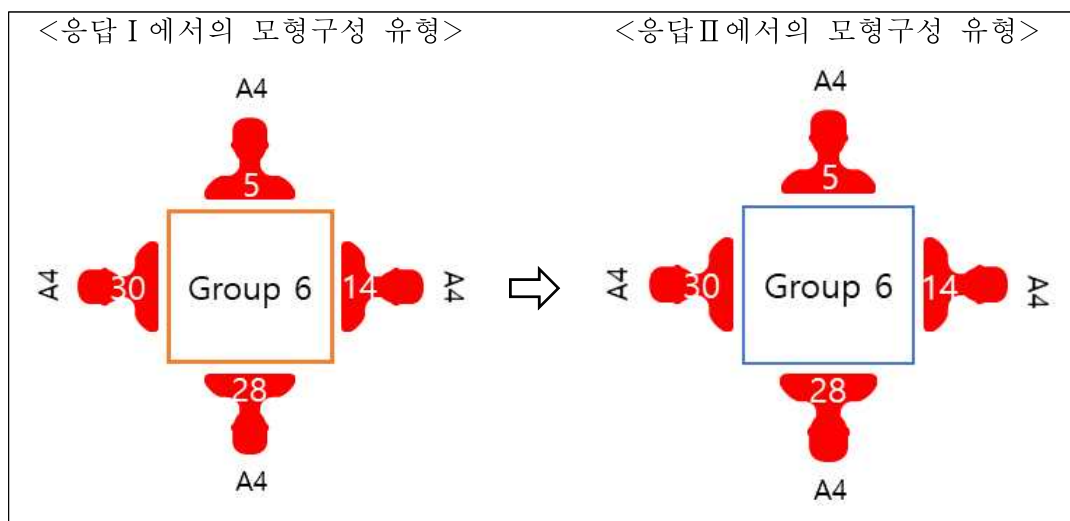
S1 : $\sqrt{5}m/s$ 나와 마찰력 계산하면.. 마찰력까지 계산하면. 이게 가속도가 $1/4m/s^2$ 이 되거든..

S25: 마찰력이 있었어...몰랐어..왜 이상하더라...

위 사례에서 참여자들은 모두 상호작용 분면에서 카트에 작용하는 마찰력을 인지하지 못하고 있다. 대표적으로 S26은 마찰력을 고려하지 않은 상태에서 상태 분면을 구성하여 해를 도출했으나 보기에 해가 없었다. S26은 자신의 모형이 틀렸음을 깨닫고 이를 수정하고자 하였으나 마찰력을 인지하지 못해 어려움을 겪었다. 잠시 후 S23이 문제 상황에서 참여자들이 놓친 부분을 지적하자 S1이 이내 마찰력을 적용하여 타당한 모형을 생성하게 된다. 이렇게 참여자들이 문제 상황 인식과 모형에 관한 정보를 공유함으로써 공동으로 모형을 수정하거나 새로운 모형의 구성을 시도하는 양상을 협업으로 분류하였다.

4) 양립성 확인

양립성 확인에서는 대응된 모형을 구성한 참여자들이 모형들을 비교하여 모형의 유사성과 차이점을 확인한다. 이때 참여자들은 경쟁을 통한 합의보다는 다른 이의 모형이 타당함을 암묵적으로 인정한 뒤 어떤 측면이 자신의 모형과 다른지 대조한다. [그림 4-30]은 이러한 양상이 관찰된 6번 문항 6조의 모형구성 유형의 변화이다.



[그림 4-30] 1번 문항 6조의 모형구성 유형 변화(양립성 확인)

1번 문항 6조는 모든 모둠원이 타당한 모형을 구성한 사례이다. 이들은 모두가 답이 같다는 것을 확인한 뒤 각자의 모형에 대해 설명한다.

S28: 답이 다 똑같은데?

S30: 다 똑같아?

(중략)

S28: 역학적 에너지 그걸로 했는데, 떨어지기 전에는 mgh 고 지면에 닿을 때 에너지는 $\frac{1}{2}mv^2$ 인데 높이가 두 배가 되면 속도는 $\sqrt{2}$ 배가 되거든? 그래 가지고 가속도는 일정한데 속도

는 시간에 비례하니까, $\sqrt{2}$ 초.

S14: 나는 일단 하나는 그래프로 했고 하나는 평균속도로 했거든? 둘 다 결과적으로 똑같은 방법인데. 속도는 0초에서 10t까지 가니까 둘이 더해서 반 나누면 $5t$ 잖아. $5t^2$ 하고.. 그래서 그걸 거기를 10으로 하면은, t^2 은 2 나오니까, $t = \sqrt{2}$.

S30: 아~

S5 : 어쨌든 속도 시간 그래프를 그리면 아래 면적이 h 일 거 아니야? 첫 번째 실험에서 근데 그 때 $t=1$ 이니까 이번에는 2 h 높이에서 떨어트리면 넓이가 두 배가 되는 거 아니야? 삼각형을 잘 이용하면 당연히 각 변의 길이가 $\sqrt{2}$ 배가 될 수 밖에 없어.

S30 : 나도 애랑(5번) 풀이과정이 같아. 그래프 그려서 했어

위 참여자들은 개념 모형과 모형의 표상 측면에서 다른 모형을 구성했다고 볼 수 있다. 다른 참여자들이 등가속도 운동 모형을 선택한 것과 달리 S28은 중력장에서의 역학적 에너지 보존 모형을 선택하여 다른 구조의 모형을 구성하였다. 또한 S14는 상태 분면에서 대상의 이동거리를 기술하는데 있어 S5와 S30과 달리 평균 속도 개념을 활용하여 수학적 조작에서 계산의 용이함을 추구하였다. 이처럼 대응된 모형을 구성한 참여자들이 각자 구성한 모형들의 유사성과 차이점을 확인하는 소집단 상호작용을 양립성 확인으로 분류하였다.

위에서 분류한 소집단 상호작용의 양상을 [표 4-15]에서 정리하고 조세부 설명을 기술하였다.

[표 4-15] 소집단 상호작용의 양상

유형	설명
튜터링	대응된 모형을 구성한 교수자가 대응된 모형을 구성하지 못한 피교수자에게 자신의 모형을 설명하고 피교수자는 이를 수용
경쟁	모형의 구조가 다른 대응된 모형을 구성한 복수의 참여자들이 서로의 모형을 비교/평가를 통해 합의를 시도함. 평가 결과가 상이한 경우 합의에 도달하지 못하고 자신의 모형을 고수.
협업	모둠에 대응된 모형이 없거나 모형이 중도에 기각된 경우 참여자들이 모형을 공동구성하기 위해 협업
양립성 확인	대응된 모형을 구성한 참여자들이 모형들을 비교하여 유사성과 차이점을 확인

4.2.2 문항별 소집단 상호작용 양상 빈도

문항별 소집단 상호작용 양상의 빈도를 [표 4-16]에 제시하였다. 소집단 상호작용의 분석 단위를 문항에 대한 모둠별 담화로 설정하여 한 모둠의 담화를 1개의 상호작용으로 분류하였다. 그러나 한 문항에 복수의 소집단 상호작용 양상이 관찰되는 경우도 있어 관찰된 상호작용의 총 빈도수는 118건이었다. 예를 들어 한 모둠에서 담화의 전반부는 A4와 A2 유형 간의 경쟁으로 분류가 되었으나 후반부에서 ID나 IG 유형과 A4 유형 간에 튜터링이 관찰되기도 하였다.

[표 4-16] 소집단 상호작용 양상의 빈도(N=118)

	튜터링	경쟁	협업	양립성 확인
1번 문항	6	0	0	4
2번 문항	4	0	2	3
3번 문항	5	2	1	2
4번 문항	5	2	0	4
5번 문항	5	1	0	3
6번 문항	7	0	1	1
7번 문항	5	5	0	1
8번 문항	8	0	2	1
9번 문항	2	7	1	0
10번 문항	6	3	2	0
11번 문항	6	1	0	2
12번 문항	5	0	3	0
합계	64(54.2%)	21(17.8%)	12(10.1%)	21(17.8%)

전체 소집단 상호작용 중에서 가장 빈번하게 관찰된 양상은 튜터링으로 전체의 54.2%를 차지하였다. 반면 협업은 가장 적게 관찰된 양상으로 전체의 10.1%에 불과하였다. 비록 제한적인 결과이기는 하나 물리 문제 해결에 관한 동료교수에서 참여자들은 가장 적합하다고 판단되는 모형을 구성한 참여자의 모형을 일방적으로 수용하는 형태의 소집단 상호작용이 가장 빈번한 것으로 확인되었다. 이는 비유 모델에 기반하여 소집단 설명모형의 발달을 관찰한 선행 연구(이신영 외, 2012)에서 학생들의 개별적인 모형이 융합된 정교형(elaborated) 유형이 가장 많이 것과는 다른 결과이다. 튜터링은 7번과 9번을 제외하고 모든 문항에서 5회 이상 관찰되었으므로 동료교수 맥락에서 벌어지는 소집단 상호작용의 주된 양상이

라 할 수 있다.

경쟁의 비중은 17.8%에 불과하였으나 7번과 9번 문항 비중이 유독 높게 나타났다. 7번과 9번 문항의 공통점은 모형구성 유형에서 A2의 비중이 매우 높았다는 점이다. 7번의 A2 비중은 62%, 9번의 A2 비중은 66%였다. 즉, 7번과 9번은 모두 내에 대응된 모형의 비중이 매우 높았으며 자연스럽게 다른 문항보다 경쟁의 빈도가 높아진 것으로 보인다. 즉, A2 유형이 많은 문항의 경우 참여자들은 수동적으로 다른 참여자의 모형을 받아들이기보다 비교/평가를 통해 능동적으로 모형을 선택하려는 경향이 두드러진다고 판단된다. 7번과 9번에서 유독 A2 비중이 큰 이유를 모형구성의 어려움과 연관 지어 이해할 수 있다. 4.1.2.절에서 참여자들은 7번과 9번에서 상호작용 기술자의 인식과 계의 설정에 어려움을 겪고 있음을 논의하였다. 이 두 가지 어려움이 복합적으로 나타나는 문항에서 참여자들은 자신의 모형구성에서 어떤 문제점이 있는지 자발적으로 파악하지 못하고 소집단 상호작용한다. 반면 A2 모형의 비중이 높았던 또 다른 3번 문항에서는 경쟁의 빈도가 그다지 높은 편이 아니었다. 3번 문항의 경우는 문제 상황의 단순 오인이 모형구성의 주된 어려움이였다. 따라서 3번 문항에서는 A2 유형의 참여자들은 A4의 모형을 접하는 것만으로 문제 상황의 오인을 인지하고 경쟁에 참여하지 않은 것으로 보인다.

협업의 빈도가 가장 높았던 문항은 12번이다. 12번 문항은 $A4+A3+A2$ 의 비율은 가장 낮고 $ID+IG$ 의 비율은 가장 높은 문항이었다. 이는 4.1.1.에서 언급한 바와 같이 12번 문항은 등가속도 운동 모형뿐만이 아니라 충격에 의한 운동 모형도 함께 적용하여 해결이 가능한 복잡한 문제 상황으로 구성되어 있기 때문이다. 가속도가 변하는 다소 익숙하지 않은 운동 상태와 더불어 특정 사건을 기준으로 다른 개념 모형을 선택해야 한다는 점들로 인해 많은 참여자들이 분면을 구성하지 못하였다. 구조적으로 완성된 모형이 존재하지 않을 경우 참여자들은 특정 개인에 의존하지 않고 적극적으로 협업하여 문제를 함께 해결하고자 하는 경향을 확인할 수 있다.

양립성 확인은 전체에서 17.8%만을 차지하였으나 응답 I 에서 정답률이 50% 이상이었던 문항에서는 상대적으로 비중이 높았다. 이는 교실응답시스템에서 참여자들의 모둠을 지정할 때 정답률이 50% 이상이면 한 모둠에 정답자를 몰아서 배치하는 경향이 있었기 때문이다. 물론 정답이 A4 유형을 의미하는 것은 아니지만 정답을 제출한 참여자가 A4일 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서 양립성 확인의 빈도는 경쟁과 협업처럼 문항의 특성보다는 모둠의 편성이 더욱 큰 영향을 미친 것으로 보인다.

4.3. 소집단 상호작용이 모형구성에 미치는 영향

앞 절에서 논의한 바와 같이 참여자들의 역할이나 대응된 모형의 존재 여부, 모형의 변화 등에 따라 소집단 상호작용의 양상은 다르게 나타났다. 본 절에서는 소집단 상호작용에서 나타나는 모형구성 요소의 상호작용과 이로 인한 모형구성의 변화를 사례 분석함으로써 소집단 상호작용이 참여자의 모형구성에 어떠한 영향을 미치고 있는지 기술하고자 한다.

4.3.1. 튜터링

튜터링에서 참여자들은 그 역할이 교수자(tutor)와 피교수자(tutee)로 명확히 구분되어 상호작용에 참여한다. 이때 참여자들의 상호작용은 교수자가 자신의 모형을 설명하고 피교수자가 이를 이해하여 수용하는 방식으로 이루어진다. 피교수가 응답 I 에서 어떤 유형의 모형을 구성했는지, 소집단 상호작용에 얼마나 능동적으로 참여하는 지에 따라 튜터링의 양상은 달라진다.

1) A4와 A2, A1 유형 간의 튜터링

먼저 피교수자가 A2나 A1 유형에 속하는 경우이다. 4.1.2.에서 논의한 대로 이 유형의 피교수자들은 대개 상호작용 기술자를 타당하게 인식하지 못했거나 상태 분면을 구성하는데 어려움을 겪은 경우가 많다. A2나 A1 유형에 속하는 피교수자들은 교수자와 모형과 문제 상황 인식에 대해 상호작용함으로써 모형구성에서 자신의 문제점을 파악하고 이를 수정할 수 있다. 또한 이러한 과정에서 타당하지 않은 모형구성의 원인이 되

는 개념 세계의 모순 혹은 결핍과 대면할 수 있게 된다.

1)에서는 7번 문항을 중심으로 튜터링에 대한 사례 분석을 진행하고자 한다. 다음의 7번 문항 7조 S15(A4)와 S18(A2)의 담화를 통해 튜터링이 A2와 A1 유형 참여자들의 모형구성에 어떠한 영향을 미치는지 구체적으로 논의하겠다

S15: 이거가 추가 하나당 1kg니까. 추가 x개니까 $x\text{kg}$ 일거 아니야. 그러면 애(추)한테 가해지는 힘이 $10x$ 일거 아냐. 그치? 근데 수레랑 추랑 합치면 $(x+2)\text{kg}$ 이잖아. 질량이 $(x+2)\text{kg}$ 인데.

S18: 근데 왜 추까지 더해야해?

S15: 이거랑 이거랑 달리 해야지. 힘이 10이니까 이게 나누면 5가 되지? 그래서 거길 계산하면 2. 2개.

(중략)

S18: 근데 이 추의 무게까지 더해서 생각해야해?

S4: 당연하지. 물체계인데.

S18: 물체계니까? 그래도 난 기억이 안 나는데.

S15: 그게 애 혼자 내려가는 게 아니잖아. 애를 끌고 가잖아. 그니까 이걸 같이 생각해줘야지 하나로. 아 그니까 이걸 네가 추를 위에 올려놓고 추를 아래로 떨어뜨린다고 생각해서 모르는 건데. 애(추)를 이렇게 올려가지고.

S18: 어. 막대로 민다고 생각하면?

S15: 중력가속도로 이렇게 당긴다고 생각하는 게 편해.

S18: 그렇네.

S15: 이렇게 전체가 딱 하나로 해가지고 $x+2$ 짜리 물체 하나고. 이것을 $10x$ 의 힘으로 당기고 있는 거야.

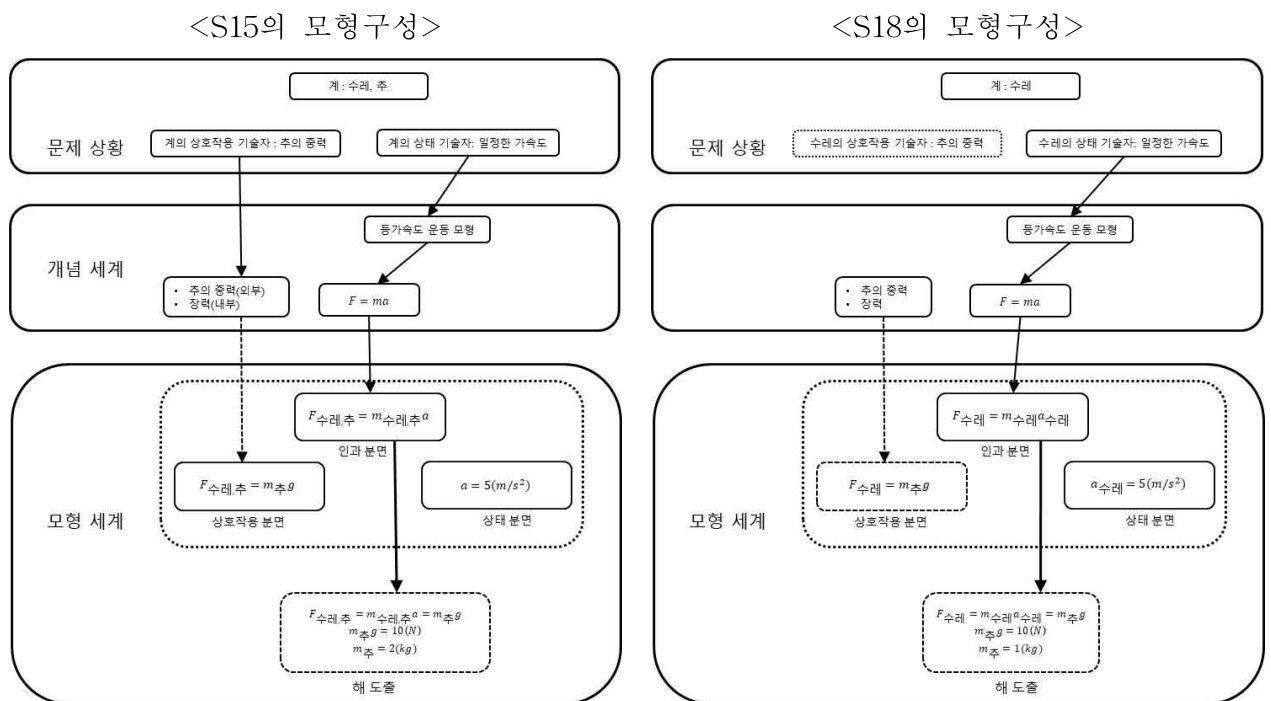
S18: 그러면 애(추)도 가속도가 5인거야?

S15: 다 같은 가속도를 받잖아 그래서.

S18: 그렇네.

S15: 근데 하나 물체가 5m/s^2 으로 이동한다 생각하면 돼.

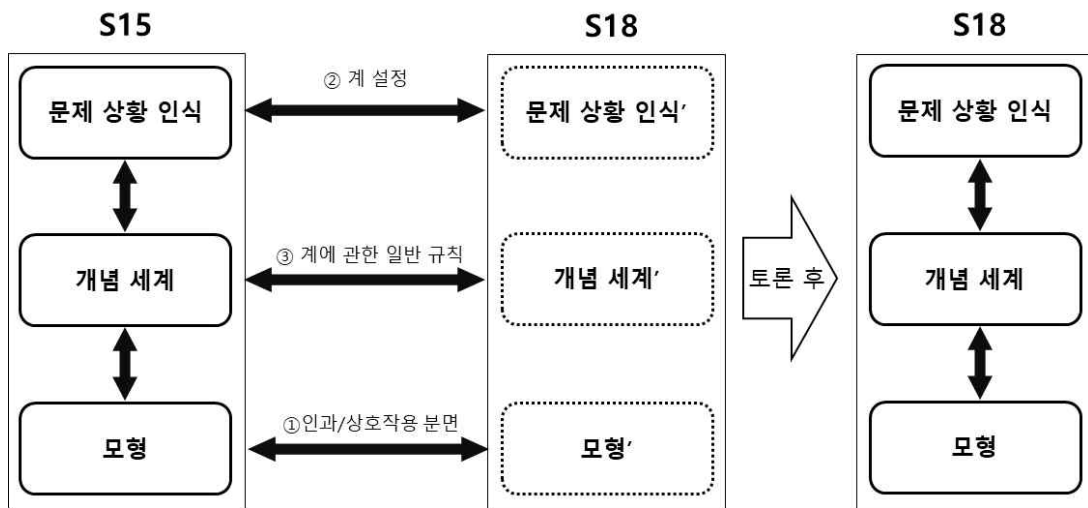
위 담화에서 피교수자인 S18은 A2 유형으로 인과 분면에서 수레만을 계로 설정하였음에도 추의 중력을 계에 작용하는 상호작용 기술자로 인식하고 상호작용 분면을 형성하였다. 이로 인해 두 분면 사이의 계 설정이 내적 일관성을 갖추지 못하였다. 반면 교수자인 S15는 수레와 추를 계로 설정하여 추의 중력을 계 외부 상호작용으로 인식하고 이를 일관성 있게 다른 분면에도 적용하여 모형을 생성하였다[그림 4-31].



[그림 4-31] 튜터링에 참여한 교수자와 피교수자(A2)의 모형구성 비교

[그림 4-32]에 S15와 S18의 모형구성 요소 간의 상호작용을 도식화하였다. 도식에서 각 모형구성 요소는 모서리가 둥근 직사각으로 표현하였으며 물리적으로 타당하면 실선, 타당하지 않으면 점선으로 표시하였다. S15는 담화 초기에 각 분면과 수학적 조작 과정을 직접적으로 제시하였다. 이를 접한 S18은 S15와 자신의 모형을 비교한 뒤 인과 분면에서 질량이 다르게 설정된 점을 파악하고 왜 수레와 추의 질량을 더해야 하는지에 대한, 즉 계의 설정에 관한 질문을 한다(①). S15는 수레와 추와 실

로 연결되어 있으므로 하나의 계로 볼 수 있으며 추의 중력이 계에 작용하는 외력임을 설명한다(②). S15의 설명은 계의 설정과 상호작용 기술자 식별에 관한 것이지만 이 과정에서 자연스럽게 계에 관한 일반 규칙을 언급하고 있다. 즉, S15는 물체계라는 용어를 통해 복수의 대상을 계로 묶어서 모형을 구성하는 계에 관한 일반 규칙을 설명하고 있는 것이다(③).



[그림 4-32] 튜터링에 참여한 S15와 S18의 상호작용과 모형구성 변화

S15와 S18의 사례는 튜터링에서 모형구성 요소의 상호작용이 어떻게 피교수자의 모형구성에 기여하는지를 잘 보여주는 사례이다. 위 사례에서 모형구성 요소 중 가장 먼저 명시적으로 드러나는 것은 모형의 상호작용이다. 담화 초기에 S15는 자신의 모형 분면과 수학적 조작을 설명하였고 S18은 이를 자신의 모형과 비교하여 차이점을 인지하고 있다. 그리고 계 설정과 기술자 식별에 관한 문제 상황의 상호작용이 관찰되었다. 이러한 순서가 절대적인 것은 아니며 다른 튜터링 사례에서는 문제 상황 인식의 상호작용이 먼저 일어나고 모형의 상호작용이 뒤를 잇기도 하였다. 상호작용이 일어나는 순서보다 주목해야 할 점은 튜터링에서 모형과 문제 상황 인식의 상호작용이 명시적으로 관찰된다는 것이다. 이를 통해 피교수자는 교수자의 문제 상황 인식과 모형을 접함으로써 자신의 모형

구성의 문제점을 인식하고 이를 수정할 수 있게 된다. 위 사례에서 S18은 자신이 구성한 모형의 인과 분면과 S15의 인과 분면의 상이함이 계 설정에서 기인했음을 알게 되었다.

그러나 인지적인 측면에서 더욱 의미 있는 것은 바로 개념 세계의 상호작용이다. 위 사례에서 S18이 타당하지 않은 모형을 구성한 이유는 단순한 실수나 문제 상황에 대한 오인 탓이 아니다. 계의 일반 규칙에 관한 개념적인 결핍이 있었기 때문이다. S18은 담화 초기에 인과 분면에서 왜 추의 질량을 더 해야 하는지 질문을 하였다. 추의 중력은 엄밀히 수레라는 대상에 작용하는 상호작용이 아니며 추와 수레를 동일한 계로 설정했을 시에만 계에 영향을 주는 외부 상호작용이 될 수 있다. 모형은 계에 대한 설명 체계를 구성하는 것이므로 계의 설정은 모든 분면에서 일관성 있게 설정되어야 한다. 즉, S18은 뉴턴 역학의 계에 관한 일반 규칙에 대해 인지하지 못하고 있었던 것이다. S15는 S18에게 자신이 왜 수레와 추를 하나의 계로 보고 있으며 추의 중력은 수레가 아니라 계에 작용하는 상호작용임을 분명히 설명하고 있다. 이 과정에서 피교수자인 S18은 계의 설정에 관한 개념 세계의 결핍을 대면하고 이를 보완할 기회를 얻게 되었다. S18에게서 개념 세계의 보완이 있었다는 근거로 8번 문항에서 S18의 모형구성을 제시하고자 한다. 마찰력이 있다는 것만 제외하면 8번 문항은 7번 문항과 계의 설정과 선택되어야 하는 개념 모형이 거의 같다. S18은 S15에게 배운 계의 설정을 8번 문항에 적용하여 타당한 모형을 생성함으로써 7번 문항에서의 튜터링이 피상적인 모형의 수용이 아닌 개념 세계의 발달에 기여할 수 있음을 보여주고 있다.

위 사례에서 교수자와 피교수자 간의 개념 세계 상호작용을 이끌어낸 것은 피교수자인 S18의 적극적인 질문과 교수자인 S15의 적절한 설명이다. S18은 뉴턴 역학의 계에 관한 일반 규칙에 대해 인지하지 못하고 있었으며 S15의 모형을 통해 이와 관련된 개념 세계의 결핍을 대면하게 되었다. S15는 S18에게 자신의 모형에서 계가 어떻게 설정되었고 그렇게 할 수 있는 근거를 설명하는 과정에서 계에 관한 일반 규칙에 대해서 언

급하였다. 만약 S18이 이에 대해 적극적으로 질문하지 않았다면 S15은 위와 같은 심도 있는 설명을 하지 않고 자신의 모형에 대한 설명만으로 담화를 끝냈을 것이다. 따라서 개념 세계의 상호작용은 피교수자의 질문에서부터 시작되며 교수자의 적절한 설명이 뒷받침됨으로써 피교수자의 모형구성에 의미 있게 기여한다고 볼 수 있다.

그러나 튜터링에서 개념 세계간의 상호작용이 명시적으로 관찰되는 것은 아니다. 7번 문항의 경우 피교수자 8명 중에서 3명에게서만 개념 세계의 상호작용이 일어났으며 나머지 5명에게는 개념 세계의 상호작용은 확인되지 않았다. 따라서 A2와 A1 유형을 대상으로 하는 튜터링에서는 개념 세계 상호작용 없이 모형과 문제 상황 인식의 상호작용도 빈번하다는 것을 알 수 있다. 다음은 개념 세계의 상호작용이 없이 모형과 문제 상황 인식의 상호작용만이 관찰된 7번 문항 1조의 S17(A4)과 S20(A2), S22(A2)의 담화이다.

S17: 이게 추의 개수인데 N개로 봤어 왜냐면 이거 하나에 1kg이라서 N이라서 Nkg인거잖아 N개면, 근데 이제 여기서 중력 가속도가 $10m/s^2$ 이면 여기 밑으로 가해지는 힘이 10N이지?

S20: 그렇지.

S17: 그러면 이제, 가속도가 $5m/s^2$ 이면 이거랑 이거랑 가속도가 같은데. 그때 가속도가 $5m/s^2$ 이라는 거잖아, 그러면 이제 N플러스 2이고...이게 2kg이고 이게 Nkg이니까. 가속도 5에다가, 이게 가속도 5이고 이게 질량 두개 합친 게 (N+2)이잖아. 그럼 이제 (N+2)*5=10N이라고 생각하는 거야.

S20: 그렇지.

S17: 그렇게 하면 10N은 이렇게 나오고 N은 2야.

S20: (활동지를 가리키면서)아 이게 맞아 가속도가 이렇게 같을 수도 있구나.

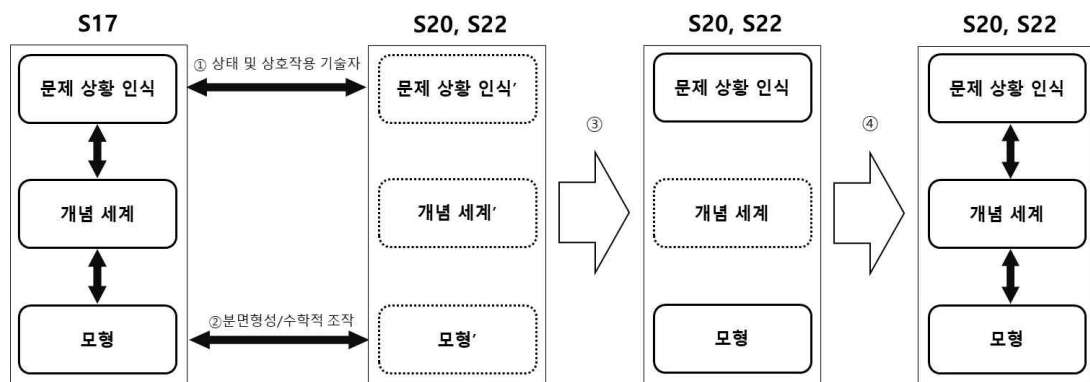
S22: (20번 활동지를 가리키면서)왜 N+2지?

S20: 가해지는 힘이 아래로 10N만큼 가잖아. 근데 그 무게가 추

N개에다가 2 더한 거. 이렇게

S17: 말 잘하네.

위 사례에서 S17은 교수자, S20과 S22는 피교수자로서 소집단 상호작용에 참여하였다. S17은 이전 사례의 S15와 S20과 S22는 S18과 동일한 모형을 구성한 상태였다. [그림 4-33]에 모형구성 요소의 상호작용을 도식화하였다. 모형구성 요소를 연결하는 화살표의 실선은 요소간의 일관성이 있음을, 점선은 그렇지 못한 것을 의미한다.



[그림 4-33] 튜터링에 참여한 S17과 S20, S22의 상호작용과 모형구성 변화

담화 초기에 S17이 추에 작용하는 상호작용 기술자와 계 전체의 상태 기술자에 대해 설명하면서 문제 상황 인식의 상호작용이 일어나고 있다 (①). 곧 이어 분면 형성에 관한 S17의 설명이 이어지며 모형 간의 상호작용이 관찰된다(②). 1조를 이전 사례 7조와 비교해보면 상호작용이 일어나는 순서는 다르지만 모형과 문제 상황 인식의 상호작용이 명시적으로 드러났다는 점이 동일하다. 흥미로운 부분은 1조도 7조와 마찬가지로 피교수자인 S22가 인과 분면에서 추의 질량을 더하는 것에 대해 질문을 했다는 점이다. S22는 자신이 구성한 모형과 S17이 구성한 모형의 차이점을 인식하고 이에 관해서 질문을 하였다. S20이 교수자를 대신하여 이에 대해 설명하였으나 수식을 언어적으로 풀어서 재진술한 것에 불과하

며 왜 더하는 것인가에 대한 이론적인 설명을 제공하지 않았다. S22 역시 이 부분에 관한 개념 세계의 결핍을 보완하기 위해 적극적으로 추가적인 질문을 하지 않아 결과적으로 개념 세계의 상호작용이 일어나지 않았다. 명시적으로 관찰된 부분만 놓고 본다면 S20과 S22은 소집단 상호작용을 통해 교수자인 S17의 문제 상황 인식과 모형만을 수용한 것으로 확인된다(③). 그러나 교수자와의 개념 세계간 상호작용이 관찰되지 않았으므로 개념 세계의 보완은 피교수자가 수정된 문제 상황 인식과 모형을 일관성 있게 연결하는 과정에서 자발적으로 일어나는 수밖에 없다(④). 만약 자발적으로 개념 세계의 보완이 일어나지 않았다면 S20과 S22는 자신의 개념 세계와 모순되는 모형을 생성한 것이므로 수용된 모형의 설명력(viability)은 담보되지 않으며 7번 문항의 모형은 다른 문제 상황을 구성하기 위한 새로운 개념 세계의 요소가 되기 어려울 것이다.

7번 문항 1조의 사례만으로 피교수자인 S20과 S22가 [그림 4-33]의 ④ 과정을 거쳐 자발적으로 개념 세계를 보완했는지를 직접적으로 확인할 수 없었다. 다만 7번과 문제 상황이 유사한 8번 문항에서의 모형구성에 있어 이를 간접적으로 가늠해볼 수 있다. 8번 문항은 수레에 작용하는 마찰력을 제외하면 7번 문항과 계의 설정과 선택되는 개념 모형이 거의 동일하다. 8번 문항에서 모형구성 유형은 S20이 A1, S22가 IG로 분류되었다. 1조의 사례에서 담화 후반부 교수자 역할까지 하며 상호작용에 적극적으로 참여한 S20은 8번 문항에서 계에 작용하는 상호작용에 수레의 무게를 포함하는 것을 보아 7번 문항에서 계의 구성에 관한 명확한 개념 세계 보완이 일어나지 않은 것으로 해석되었다. 뿐만 아니라 S22는 오히려 8번 문항에서 어떤 모형의 분면도 형성하지 못하였다. 이는 앞의 사례에서 S18이 8번 문항에서 타당한 모형을 구성한 것과는 대조적인 결과이다. 따라서 [그림 4-33]의 ④과 같은 개념 세계의 자발적인 보완은 S20과 S22에게서 일어나지 않은 것으로 해석할 수 있다.

7번 문항의 1조와 7조 사례를 통해 A1과 A2유형에 대한 튜터링에서 피교수자는 교수자와의 문제 상황 인식과 모형의 명시적인 상호작용을

통해 자신의 모형구성의 문제점을 인지하고 이를 수정함을 확인하였다. 그러나 이 과정에서 개념 세계의 상호작용은 제한적으로 일어나며 개념 세계의 상호작용이 일어나지 않은 경우 피교수자는 수정된 모형과 자신의 개념 세계 사이의 일관성 있는 연결을 통해 자발적으로 개념 세계를 수정해야 한다. 그렇지 못한 경우 수용된 모형은 설명력을 지니지 못할 개연성이 크며, 소집단 상호작용이 참여자들의 개념 세계를 확장하는데 기여하기는 어려울 것이다. 7번 문항에서 개념 세계의 상호작용이 관찰되지 않은 A2유형의 피교수자는 모두 4명이었으며 이 중에서 8번 문항에서 타당한 모형을 구성한 참여자는 1명에 불과하고 나머지 3명은 A1, IG, Un 등으로 분류되었다. 이러한 결과는 개념 세계의 명시적인 상호작용 없이 피교수자가 동료의 모형을 수용하여 자발적으로 개념 세계의 결핍이나 모순을 자발적으로 보완하는 것이 매우 어려운 인지적 과정임을 나타낸다.

위 논의를 정리하면, A2와 A1 유형의 참여자들을 피교수자로 하는 튜터링에서 피교수자들은 교수자의 모형과 문제 상황 인식을 수용하는 과정을 통해 자신이 구성한 모형구성의 문제점을 인지하고 이를 수정하는 것으로 나타났다. 그러나 타당하지 않은 모형구성의 원인이 단순한 수학적 조작의 실수나 문제 상황에 대한 오인이 아니라 개념 세계의 결핍이나 모순에서 기인하는 경우 개념 세계의 보완은 제한적으로 일어나는 것으로 확인되었다. 피교수자의 적극적인 질문과 교수자의 적절한 설명을 통해 개념 세계의 상호작용이 유도되면 개념 세계의 결핍이 보완되고 피교수자는 일관된 모형구성에 성공하였다. 반면 개념 세계에 대한 직접적인 상호작용이 유도되지 않으면 피교수자가 모형과 문제 상황을 일관성 있게 연결하는 과정에서 자발적으로 개념 세계의 결핍을 보완해야 하며 본 연구에서 제시한 7번 문항의 사례에서 이는 성공적이지 못했다. 이 경우에 피교수자들은 자신의 개념 세계와 모형 사이의 모순을 인지하지 못한 채 단지 결과적인 모형만을 수용한 것으로 해석되었다.

2) A4 - ID, IG 유형 간의 튜터링

앞에서 논의한 튜터링이 A2 혹은 A1과 같이 모형의 분면을 부분적으로나마 구성한 참여자들에 관한 것이었다면 이번에는 ID와 IG 유형의 참여를 대상으로 하는 튜터링이 모형구성에 기여하는 바를 기술하고자 한다. 이 두 유형의 참여자들은 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 분면을 구성하지 못했으므로 소집단 상호작용은 일방적일 가능성이 크다. 다음은 이와 관련된 3번 문항 8조 S10(A4)과 S8(ID)의 담화이다.

S10: 최대정지 마찰력이 10,000N까지 가잖아.

S8 : 어.

S10: $F=ma$. 자동차 질량이 10kg이니까. 애가 브레이크를 짹 밟으면 그 가속도가 $10m/s^2$ 이니까...

S8 : 아 $F=ma$ 니까. 1초에 최대 10m/s 속도를 줄일 수 있다는 거잖아.

S10: 그러면 고속도로에서 30m/s로 달리고 있는데 10m/s까지 줄이래. 하이패스는 그래서...

S8 : 그럼 2초 걸리겠네.

S10: 어 줄이는데 2초가 걸려 그러면 속도를 30에서 10으로 줄이는데 2초가 걸리는데

S8 : 그러면 걸린 시간 측정 해야겠네.

S10: 어 그럼 그 뜻은 내가 브레이크를 밟고 2초 후에 하이패스에 들어가면 된다는 거잖아.

S8 : 어.

S10: 그러면 이 속도가 30-10t만큼...브레이크를 밟는 구간에서...

S8 : 30-10t. 왜 이거야? 아 이해했어. 이해했어.

S10: 2초 동안에 30-10t인데 그래서 이거를 그래프로 그려가지고 넓이를 구하면 여기가 40이거든? 여기가 40이면 여기가 120에서 160가잖아.

S8 : 이게..y축이 뭐지..?

S10: y축이 v고 이게 t야.

S8 : t 그러면 이동거리겠네.

S10: 어 이 이동거리가 여기가 40.

S8 : 40이잖아 그럼 이게 160이지.

S10: 여기 전체가 100인데.

S8 : 아 100이구나.

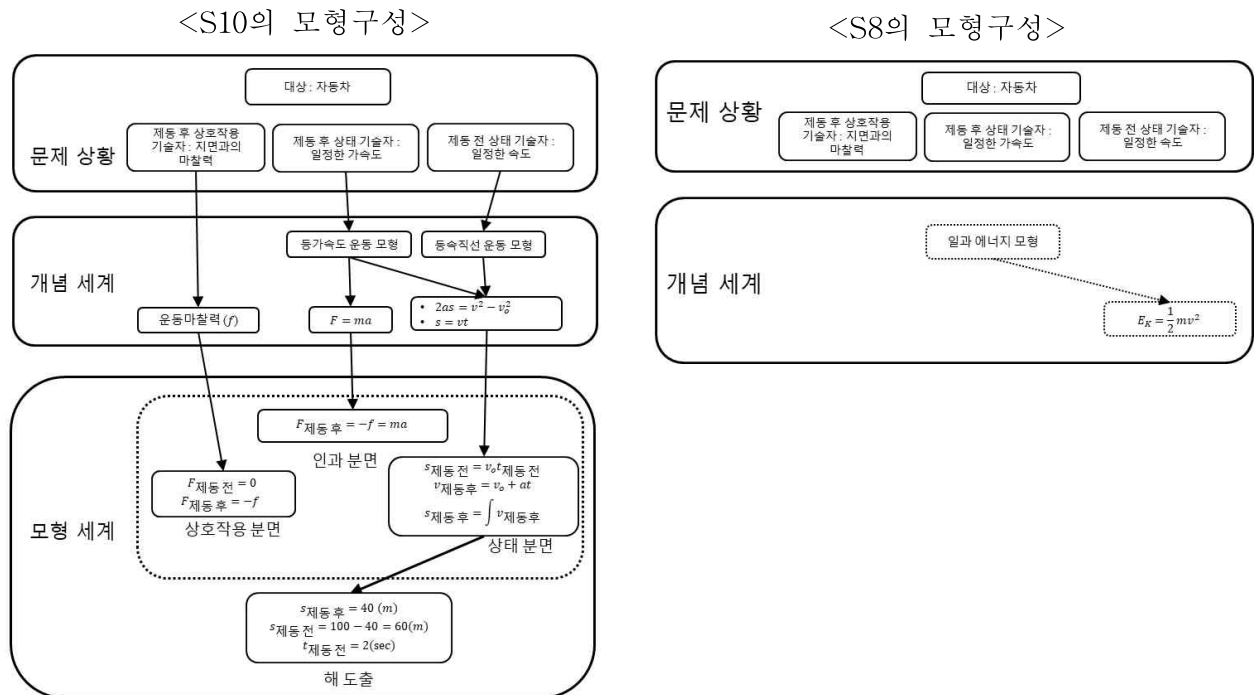
S10: 60이잖아.

S8 : 여기 60에다 30을 나눠서 2가 나온다고?

S10: 응.

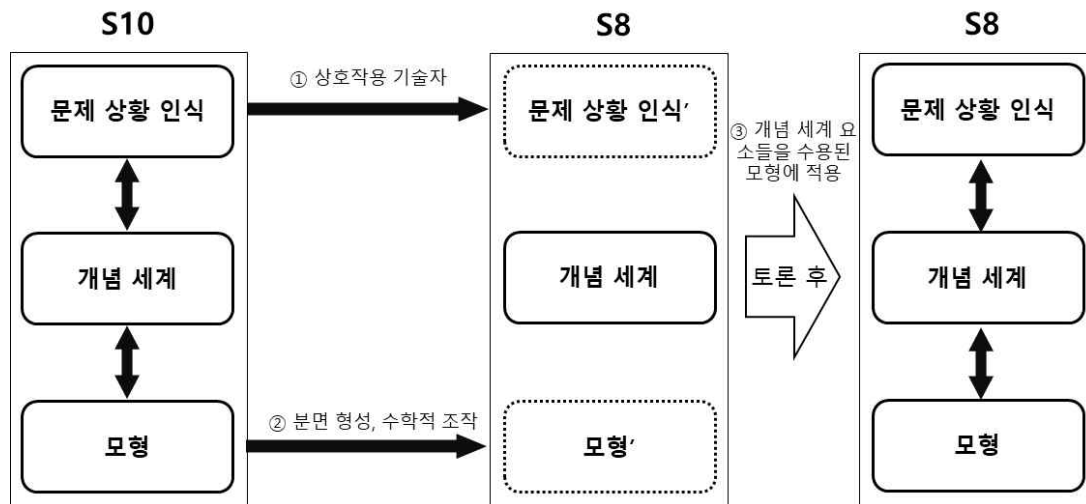
S8 : 아~ 쉽네...

위 담화에서 피교수자인 S8은 임의적으로 일-에너지 모형을 선택하여 모형을 구성하고자 한 ID 유형의 참여자였다[그림 4-34]. S8은 문제 상황을 면밀하게 분석하여 일-에너지 모형을 적용한 것이 아니라 떠오르는 공식 중의 하나를 임의로 사용했던 것이다. 따라서 본인의 모형을 고려하지 않고 전적으로 S10의 모형을 수용하고자 하는 모습을 보인다. 그러나 S10은 이전 7번 문항 1조와 7조 사례의 피교수자들보다 훨씬 적극적인 자세로 소집단 상호작용에 참가하며 자신의 개념 세계와 교수자의 모형을 연계하여 수용하고자 하는 모습을 보인다.



[그림 4-34] 튜터링에 참여한 교수자와 피교수자(ID)의 모형구성 비교

[그림 4-35]에 S10과 S8의 모형구성 요소의 상호작용을 도식화하였다. 요소를 연결하는 화살표가 이전 사례와 달리 일방향인 이유는 S8이 사전에 인식하고 있던 문제 상황과 모형이 담화에서 S10에게 전달되지 않고 S10의 모형구성을 수용하기만 하는 일방적인 형태의 상호작용이 관찰되었기 때문이다. 교수자인 S10은 자동차에 작용하는 최대 마찰력을 상기시키고(①) 이를 상태 분면과 인과 분면에 적용하여 브레이크가 작동한 후의 가속도와 이때의 제동 시간을 구하였다(②). 그리고 브레이크가 작동하는 구간의 그래프를 작성하여 상태 분면을 구성하고 넓이를 계산하여 제동 거리를 구하는 방법을 설명하였다(③).



[그림 4-35] 튜터링에 참여한 S10과 S8의 상호작용과 모형구성 변화

S8은 스스로 구성한 모형 분면이 없는 피교수자이므로 전적으로 S10의 모형을 수용하는 방식으로 소집단 상호작용에 참여하고 있다. 두 참여자의 소집단 상호작용에서 가장 인상적인 부분은 S8이 S10의 모형을 자신의 개념 세계와 연관 지으며 수용하고 있다는 점이다. 위 담화에서 밑줄 친 S8의 발화는 S8의 개념 세계와 수용된 모형을 연결하는 것으로 S8이 운동 2법칙, 가속도와 속도의 관계, 속도-시간 그래프의 넓이에 관한 개념을 이해하고 있음을 보여주고 있다. S8은 S10의 모형을 수동적으로 수용하지 않고 자신의 개념 세계를 활용하여 S10의 모형과 문제 상황 인식을 이해하였으며 최종적으로 각 요소가 모두 타당하고 일관된 모형을 구성하게 되었다(③). S8이 이러한 방식으로 모형구성이 가능했던 이유는 등가속도 운동과 등속직선 운동 모형에 대한 지식이 뒷받침되었기 때문이다. 비록 S8은 담화 전에는 이러한 지식들을 문제 상황에 적용하여 모형을 구성하는 방법을 모르고 있었지만 S10의 모형을 자신의 개념 세계를 매개로 이해하고 수용함으로써 모형구성 요소들이 내적 일관성을 갖추게 되었다. S8은 1, 2번 문항에서는 모두 IG 유형이었으나 3번과 문제 상황이 유사한 4번 문항에서 A4 유형이 되었다는 점에서 3번 문항의 튜터링은 S10 개념 세계를 활용하여 모형을 구성하는데 의미 있는 기여

를 했다고 볼 수 있다.

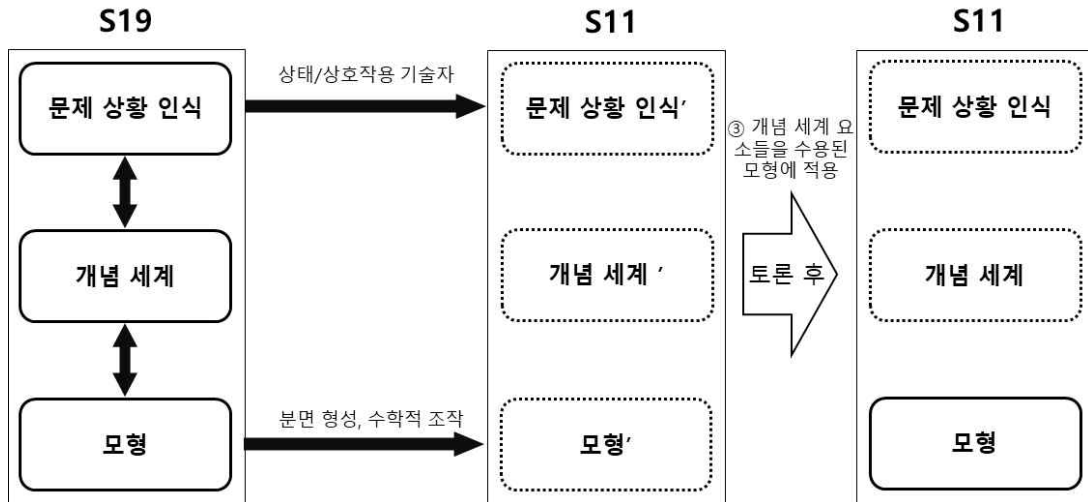
반면 개념 모형에 대한 이해와 지식이 현저히 부족한 피교수자들은 교수자의 모형을 수용하는 과정에서 자신의 개념 세계의 보완도 이뤄져야 한다. 따라서 1)의 7번 문항 7조의 사례에서처럼 개념 세계의 상호작용이 명시적으로 이뤄지거나 수정된 모형과 문제 상황 인식간의 내적 일관성을 확보해가는 과정에서 피교수자가 자발적으로 개념 세계의 모순과 결핍을 인지하고 이를 보완해야 한다. 다음은 12번 문항 3조 S19(A4)와 S11(IG)의 담화이다.

S19: 애가 $F-t$ 그래프잖아. Ft 가 충격량이지, 그럼 200곱하기 4 곱하기 $1/2$ 하면 얼마 돼? 400나오겠지? 근데 400이 $mv - mv_0$ 잖아. m 은 여기서 50kg이랬지?... (중략)...그니까 $50v_0$ 야. v_0 가 8이야. v 가 0이니까. v_0 가 8인데 나중속도가 0이잖아. 근데 a 가 중력가속도지 여기서 떨어지니까? 그래서 t 가 0.8.

S11: 충격량...지구과학이나 같까. 이해를 포기한다.

피교수자인 S11은 12번 문항에 관한 모형 분면을 전혀 구성하지 못하고 직관적으로 해를 추측한 상태였으므로 모형구성 요소 간의 상호작용은 일방향으로 일어났다[그림 4-36]. 또한 S19의 설명은 모형 생성과 기술자 식별 단계가 혼재되어 나타나 그 순서를 명확히 구분하기가 어렵다. S11은 S19의 문제 상황 인식과 모형을 수용하는 과정에서 어떤 개념 세계의 결핍을 대면했는지 드러내지 않음은 물론 이를 해결하기 위한 질문 또한 없었으므로 개념 세계의 상호작용은 일어나지 않은 것으로 볼 수 있다. 12번 문제는 가속도 운동 모형이므로 이를 정량적으로 해결하기 위해서는 충격에 의한 운동 모형을 선택하여야 한다. 그러나 S19의 설명에서 개념 모형과 문제 상황의 동형성(isomorphism)에 대한 언급은 없다. 따라서 S11은 소집단 상호작용 이후에도 문제 상황의 특정 유형 혹은 기술자에 대한 명확한 인식이 결여되었을 가능성이 크다. 결국 S11은 S19의 모형 혹은 모형의 수학적 결과만을 수용한 것이며 문제 상황

인식, 개념 세계 및 모형이 일관된 모형구성에 성공했다고 보기 어렵다.



[그림 4-36] 튜터링에 참여한 S19와 S11의 상호작용과 모형구성 변화

이전 사례의 S8과 달리 S11이 S19의 모형을 수용하여 일관된 모형구성을 하지 못한 이유를 두 가지 측면에서 논할 수 있다. 첫 번째 측면은 S11의 소극적인 태도이다. S8이 교수자의 설명에 적극적으로 호응하고 질문하는 등 담화에 능동적으로 참여한 것과 달리 S11은 질문을 하지 않고 S19의 설명을 듣고만 있다. 만약 충격량에 대한 설명이 이해가 가지 않았다면 잠시 설명을 끊고 이에 대해 질문할 수도 있음에도 S11은 이러한 적극적인 노력을 보이지 않았다. 만약 S11이 적극적으로 충격에 의한 운동의 개념이나 기술자들에 대해 질문했다면 개념 세계의 상호작용을 유도할 수도 있었을 것이다. 또 다른 측면은 충격에 의한 운동 모형에 관한 S11의 지식 혹은 이해의 부족이다. 개념 모형에 관한 지식과 이해가 현저히 부족한 경우 피교수자들은 모형의 수용만으로 자발적으로 개념 세계의 결핍을 보완하기 어려움은 물론 무엇을 질문해야할지 막막할 것이다. 물리 문제해결은 학습자가 문제 상황에 적합한 개념 모형을 선택하여 설명 체계를 구성하는 활동이다. 이러한 관점에서 개념 모형에 대한 이해가 현저히 떨어지는 참여자들의 경우 문제해결보다는 개념 모

형에 대한 기본적인 이해와 지식의 습득을 도와줄 수 있는 활동이 선행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

종합하면 ID나 IG 유형의 참여자들이 피교수자인 튜터링은 모형과 문제 상황 인식 간의 상호작용이 주로 관찰된다는 점에서 A2, A1 유형을 대상으로 하는 튜터링과 유사하다. 그러나 설명이 교수자에서 피교수자로 일방적인 전달되며 담화에서 피교수자의 문제 상황 인식과 모형이 드러나지 않는다는 점에서 차이를 보였다. 3번 문항 8조와 12번 문항 3조의 사례를 통해 튜터링이 ID와 IG 유형의 참가자들의 모형구성에 의미 있게 기여하기 위해서는 피교수자가 관련 개념 모형에 대한 어느 정도의 지식을 가지고 있어야 하며 이를 매개로 교수자의 모형을 이해하는 것이 중요함을 확인하였다. 피교수자가 소극적으로 상호작용에 참여하거나 개념 모형에 관한 개념 도식을 가지고 있지 못하면 모형의 결과적인 측면만을 수용하여 내적으로 일관된 모형구성에 실패할 개연성이 크다.

본 연구에서 잠정적으로 확인한 일부 경향성에도 불구하고 튜터링이 모형구성에 기여하는 바에 대한 일반적인 결론을 내리는 것은 다음과 같은 요소로 인해 제한된다. 참여자의 성격, 동료와의 친밀함, 인지적인 부하 정도 등에 따라 튜터링의 양상은 달라졌다. 본 연구에서 거의 대부분의 문항에서 모형을 구성하지 못한 S6과 S16은 내향적인 성격으로 소집단 상호작용에 참여하는 것을 부담스러워했다. 결국 두 참여자가 모형구성에서 어떤 어려움을 겪고 있으며 교수자의 설명이 그들의 모형구성에 어떠한 기여를 하였는지 확인하기 어려웠다. 또한 동료와의 과도한 친밀함이나 어색함은 상호작용에서의 집중력과 적극성을 저해하는 요인으로 관찰되었다. 뿐만 아니라 인지적인 부하가 과도하다고 느낀 IG나 ID 유형의 참여자 중 일부는 모둠에 토의에 참여하지 않고 겉도는 모습을 보이기도 하였다.

4.3.2. 경쟁

경쟁은 다른 구조의 모형을 구성한 참여자들 간의 상호작용이다. 튜터링에서는 피교수자가 교수자의 모형이 타당하다고 암묵적으로 혹은 명시적으로 인정한 상태에서 교수자와 상호작용하지만 경쟁에서는 참여자들은 각자의 모형이 타당하다는 입장에서 대등하게 상호작용에 참여한다. 경쟁에 참여하는 참여자들의 모형은 해가 문항의 보기 중의 하나와 일치하여 타당성의 외적 요인을 충족한 상태였다. 따라서 참여자들은 주로 타당성의 내적 요인을 기준으로 어떤 모형이 적합한지 논의하고 이를 통해 합의를 도출하고자 한다.

1) 합의를 통한 모형의 수용

먼저 모형 간의 비교와 평가를 통해 참여자들이 어떤 모형구성이 적합한지 합의하고 이를 수용하는 경우이다. 10번 문항 4조 S17(A4)과 S13, S31(A2)의 사례를 통해 이에 대해 구체적으로 논의하고자 한다.

S13: 그러면 이렇게 둘이 가고 있어. 그 상태에서 영희가 당기잖아. 그니까 그냥 정지한 선에서 철수가 간다고 생각하면 되는 거야.

S17: 아니야 작용 반작용이잖아. 애가 애를 당기면 애도 애를 당기는 거야. 왜냐면 내가 애를 미는 동안 나도 애한테 밀리는 건 똑같은 거잖아. 봐봐 내가 칠 때. 그니까 방금 똑같잖아. 왜냐하면 작용 반작용할 때...

S13: 아 근데 근데 그냥 철수가 온다고 생각을 하면 5번이 맞거든? (17번을 가리키며) 근데 애말 듣고 보니까...

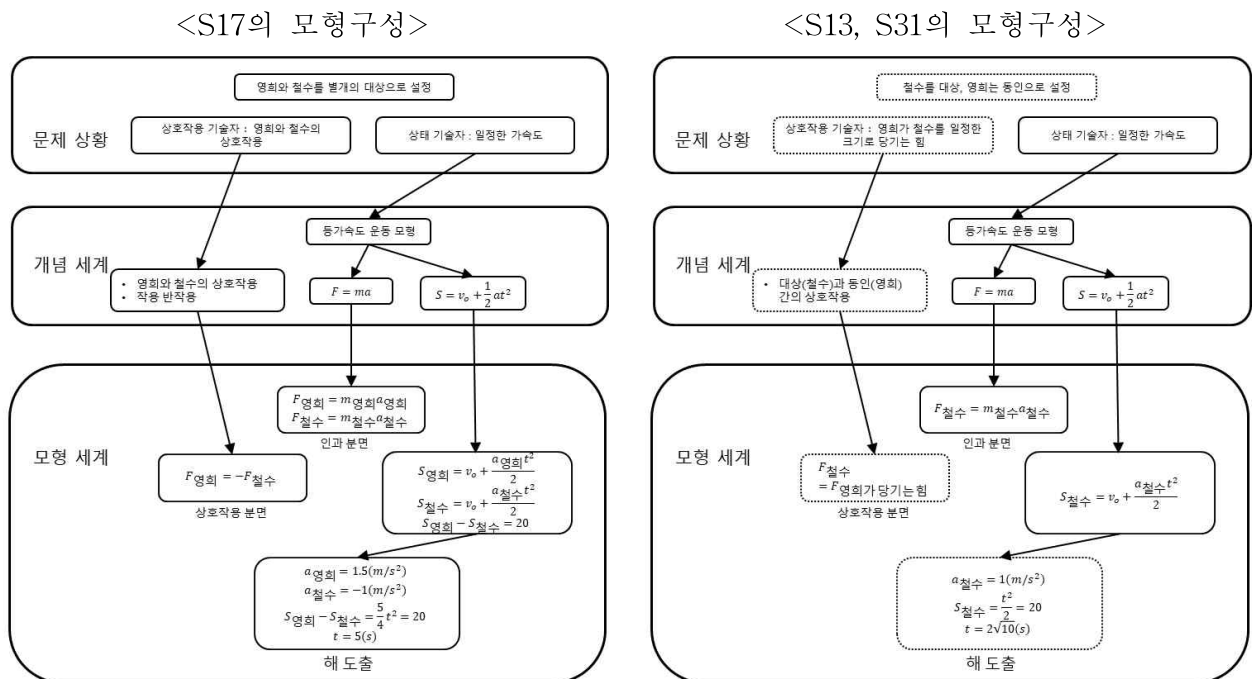
S17: 영희가 애를 75N의 힘으로 당기면 이쪽 방향으로 75N이 작용하잖아. 그러면 철수의 가속도가 $-1m/s^2$ 이잖아. 그러면 영희는 $3/2m/s^2$ 이거고. 그럼 어차피 여기서 $2m/s$ 를 왜 생각할 필요가 없냐면. 네 말대로 어차피 멈춰있다 생각하면

똑같은 거야. 왜냐하면 멈춰있을 때랑 내가 당겼을 때 하고 움직일 때 당기는 거하고 가속도는 같으니까. 같은 시간동안 이동한 거리가 같단 말이야...(중략)

S13: 그니까 나랑 31번은 이게 작용 반작용 생각 안하고. 애만 된다고 생각을 했어. 그럼 그냥 간단하게 5번이 나와.

S31: (13번 말에 동의하고 17번을 가리키며) 애가 맞는 거 같아.

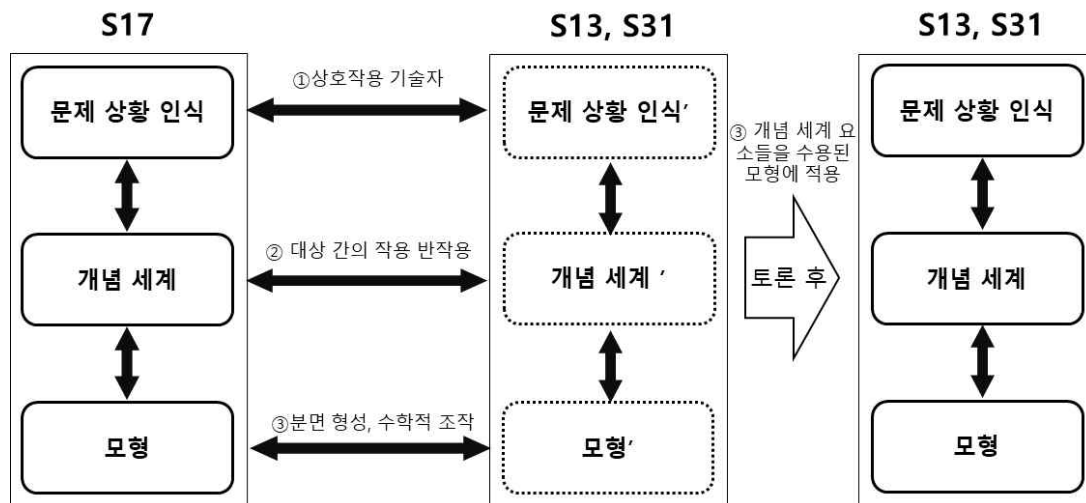
10번 문항 4조의 사례에서 참여자들은 모두 자신의 모형이 대응되었다는 판단 하에 소집단 상호작용에 참여하였다. S17은 영희가 철수를 당기는 힘의 반작용을 고려하였고 S13과 S31은 반작용을 고려하지 않고 철수만 끌어 당겨진다고 인식하고 모형을 구성하였다[그림 4-37]. 즉, 두 모형의 차이는 상호작용 기술자 식별에서 비롯되었다고 할 수 있으며 참여자들은 각자가 식별한 상호작용 기술자에 일관되게 모형을 구성하였다



[그림 4-37] 경쟁에 참여한 S17(A4)과 S13, S31(A2)의 모형구성 비교

위 사례에서 참여자들의 소집단 상호작용을 [그림 4-38]에 도식화하였다. 담화 초기 S13과 S17은 대상에 작용하는 상호작용 기술자에 대한 의견을 보이고 있다. S13은 철수에게만 힘이 작용하며 S17은 영희와 철수 모두에게 힘이 작용한다고 주장하고 있다(①). S17은 S13을 설득하기 위하여 작용 반작용에 대한 개념적 설명을 한 후에(②) 자신의 모형을 상세히 제시하고 있다(③).

S13과 S17은 외형적으로 보면 상호작용 기술자 식별에서 어려움을 겪은 것으로 보이지만 본질적인 원인은 작용 반작용에 관한 개념 세계의 결핍에서 비롯된 것이다. 따라서 문제 상황 인식의 상호작용은 자연스럽게 개념 세계의 상호작용으로 전환되었으며 이를 통해 S13과 S31은 작용 반작용 개념을 받아들이고 S17의 모형이 타당함을 합의하였다.



[그림 4-38] 경쟁에 참여한 S17과 S13, S31의 상호작용과 모형구성 변화

10번 문항 4조의 사례와 같이 경쟁 유형으로 소집단 상호작용을 하는 참여자들은 대응된 모형을 구성한 참여자가므로 상대방의 모형을 수동적으로 수용하지 않고 어떤 부분에서 차이가 있고 어떤 모형이 타당한지 평가한다. 이 과정에서 모형뿐만 아니라 문제 상황 인식의 상호작용이 일어나게 된다. 만약 모형의 차이가 단순한 문제 상황의 오인이 아닌 개념 세계에서 기인한 것이라면 개념 세계 간의 상호작용도 일어나게 되며

이 과정을 통해 참여자들은 개념 세계의 결핍과 모순을 대면하고 이를 보완할 기회를 얻게 된다. 동료의 모형을 수용함으로써 모형을 수정한다는 점에서 경쟁은 A2, A1을 대상으로 하는 튜터링과 상당히 유사하다. 그러나 모둠원들의 역할이 고정적이지 않고 대등하며 자신의 모형과 문제 상황 인식, 개념 세계를 명시적으로 노출한다는 점에서 경쟁은 튜터링 보다 더 역동적이고 적극적으로 참여자의 모형구성에 기여한다고 볼 수 있다.

2) 모형의 고수

한편, 모둠 내에서 모형의 합의가 이뤄지지 않을 경우 경쟁은 지속된다. 9번 문항의 경우 전체에서 가장 높은 빈도(7회)로 경쟁 유형이 나타났다. 모둠원들 간에 합의가 이뤄지지 않고 각자 자신의 모형을 고수하는 경우도 자주 관찰되었다. 9번 문항의 어떤 요인이 참여자들 간의 경쟁을 유발하며 자신의 모형을 고수하게 했는지 논의할 필요가 있다. 다음은 9번 문항 4조 참여자들의 담화이다.

S9 : $F=ma$ 로 따지고 애(소형차)는 가속도가 5니까 5,000N이지?
 애(트럭)는 10,000N이고. 근데 애(트럭)는 힘이 없잖아. 애(소형차)가 애(트럭)를 밀어주는 거잖아. 밀어주는 힘이 10,000N이니까. 작용반작용에 의해서 반대쪽 힘도 10,000N. 그래가지고.

S28: 근데 왜 나는 애초에 그냥 차가 이렇게 운동하니까. 애(소형차)가 처음에 15,000N, 15,000N의 힘을 줘가지고 이렇게 움직이는 거니까. 트럭도 애(소형차)를 15,000N을 밀어서 움직이는 줄 알았어. 아닌가?

S12: 그렇게 따지는 거 아니야?

S21: 아니야. 아니야.

S28: 그러니까 처음에 트럭을 밀 때 애(소형차)가 가속도를 많이 줘가지고 15,000N의 힘으로 미니까.

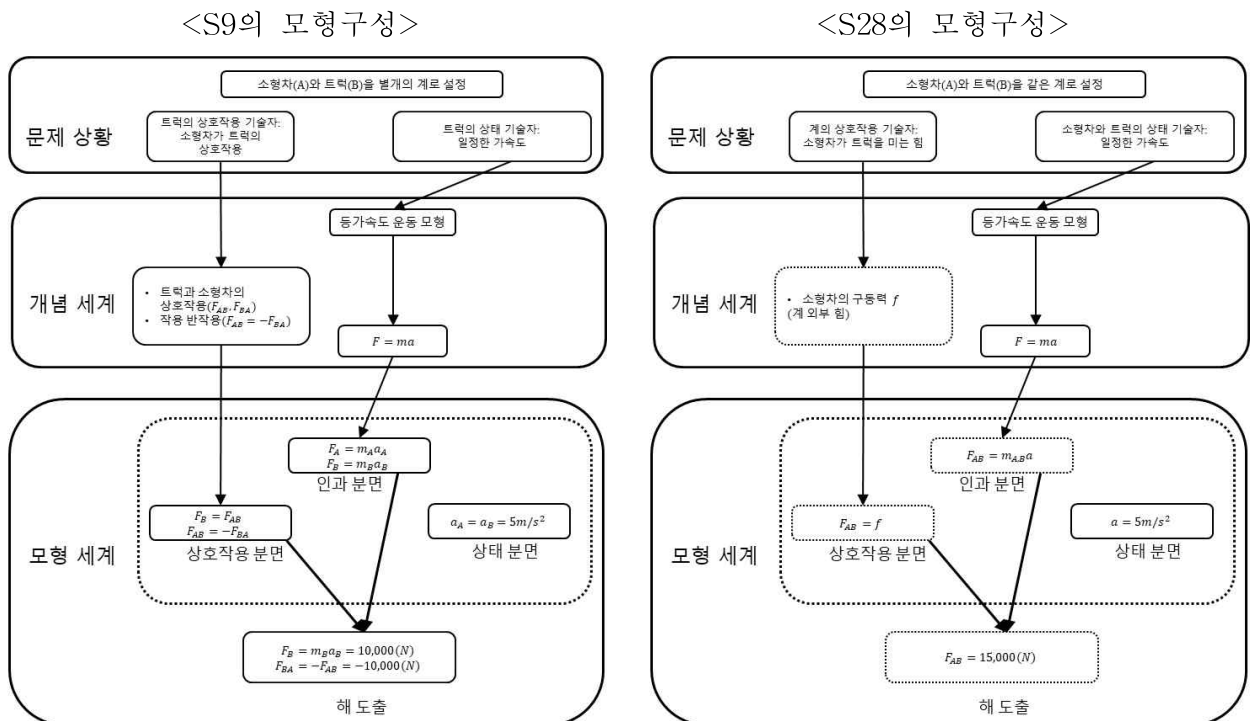
S9 : 근데 15,000N을 미는 거는. 미는 방향의 반대가 아니라 앞으

로 이동을 하는 거 아니야?

(중략)

S28: 난 아무리 봐도 D야. 맞아 이게. 15,000N으로 미니까 같이 이렇게 딱 가는 거지.

위 사례에서 S9와 S28은 토론이 끝난 후에도 합의하지 않고 자신의 모형을 고수하였다. [그림 4-39]를 통해 두 참여자의 모형구성을 비교해보면 S9는 트럭만을 계로 설정하여 트럭이 소형차를 미는 힘을 이용하여 소형차가 트럭을 미는 힘을 구하고자 하였다. 반면 S28은 소형차와 트럭을 하나의 계로 설정하여 모형을 구성하였다. 그러나 S28은 계 내부의 상호작용인 소형차가 트럭을 미는 힘을 계 외부의 힘이라고 오인하여 인과 분면에 포함하였다.



[그림 4-39] 경쟁에 참여한 S9(A4)와 S28(A2)의 모형구성 비교

계 외부의 힘, 즉 자동차 타이어와 지면 사이의 정지마찰력을 인식하

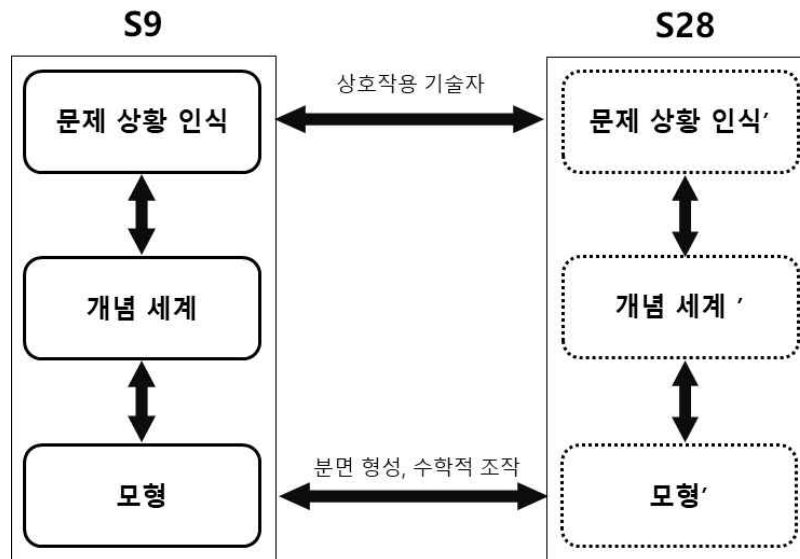
지 못한 S28은 소형차가 트럭을 미는 힘을 계 외부에서 작용하는 힘으로 오인한 것으로 보인다. 뉴턴 역학의 계와 관한 일반 규칙에 따르면 계 내부 대상간의 상호작용은 계 전체 운동에 영향을 줄 수 없다. 타당하지 않은 모형구성에도 불구하고 S28이 자신의 모형을 계속 고수하고 S9의 모형을 수용하지 않은 이유는 S9의 모형에서는 계 전체의 운동에 영향을 미치는 외력이 고려되지 않았기 때문이다. S9는 트럭만을 계로 설정했으므로 소형차가 트럭을 미는 힘만이 계(트럭) 외부의 상호작용이다. 따라서 S9는 명시되지 않은 상호작용을 고려할 필요 없이 트럭의 인과 분면을 구성할 수 있다. 결국 S9와 S28은 각자의 계 설정이 다르다는 점을 인지하지 못한 채 모형과 상호작용 기술자에 관한 논의만을 진행했기에 때문에 어떤 모형이 적합한지에 대해 끝내 합의하지 못하였다.

이를 S9와 S28의 모형구성 요소의 상호작용 관점에서 보면 개념 세계의 상호작용 보다는 모형과 문제 상황 인식의 상호작용만이 부분적으로 일어나고 있다고 해석할 수 있다[그림 4-40]. 두 참여자는 계를 다르게 설정했으므로 상호작용 기술자 식별과 각 분면이 상이할 수밖에 없다. 이러한 상황에서 참여자들은 이전 10번 문항 4조의 사례와 같이 모형의 상이함이 기인하는 계의 설정에 관한 논의를 했어야 한다. 그러나 이 사례에서는 계의 설정과 이와 관련된 개념 세계의 상호작용이 일어나지 않고 모형의 상호작용 분면에 대한 상호작용이 지속되었기 때문에 모형의 타당성에 대한 합의에 이를 수 없었다. 이는 참여자들이 계에 관한 일반 규칙에 대해 무지하였거나 모형의 차이가 계의 설정에서 비롯되었다는 것을 인지하지 못했기 때문이다.

이와 같이 경쟁을 통해 합의가 이뤄지지 않은 경우 참여자들의 모형구성의 변화나 개념 세계의 보완을 확인할 수는 없었다. 그러나 관련 내용에 관한 능동적이고 적극적인 논의를 유도함으로써 자신의 생각을 명료화하고 인지적 갈등을 경험하게 한 것은 긍정적인 측면이라 할 수 있다.

위 사례에서 참여자들이 모형의 타당성을 평가하는데 있어 어려움을 겪은 부분이 계의 설정이라는 점은 교수적인 측면에서 시사하는 바가 크

다. 모형구성 관점에서 물리 문제해결은 문제 상황에 관한 설명 체계를 구성하는 것이다. 따라서 문제 상황을 어떻게 인식하고 계를 설정하는가에 따라 모형의 구조와 요소는 달라진다. 그러나 중학교 이후의 물리 교육과정이나 교과서에서 이러한 부분에 대한 명확한 내용과 지침이 다루지 않고 있다. 이로 인해 많은 참여자들이 계 내부와 외부의 상호작용을 구분하는 것이 왜 중요하며 어떤 상호작용을 계의 인과 분면에 적용해야 하는지 혼란을 겪고 있는 것이다(Ji *et al.*, 2016). 따라서 뉴턴 역학의 기초적이고 핵심적인 가정과 특성을 학습하는데 있어 운동 법칙 중심의 전통적인 내용 조직이 적합한가에 대한 심도 깊은 논의가 필요할 것으로 보인다.



[그림 4-40] 경쟁에 참여한 S9와 S28의 상호작용

4.3.3. 협업

모둠 내에 대응된 모형이 없거나 논의 과정에서 모형이 기각된 경우 참여자들은 협업을 통해 모형을 수정하거나 새롭게 생성하고자 한다. 일부 모둠은 협업을 통해 모형구성에 성공한 반면, 모형을 구성하지 못한

채 토의를 마친 모둠도 있었다. 사례 분석을 통해 협업에서 모형구성 요소의 상호작용 양상을 분석하여 협업의 각 사례에서 소집단 상호작용이 모형구성에 다른 영향을 미치는지 그 이유를 탐색하고자 한다. 다음은 협업을 통해 모형을 타당하게 생성한 6번 문항 6조의 사례이다.

S26: 나 $\sqrt{8}m/s$ 나왔는데. 찍었다니깐. 나 풀었는데 풀 때마다 $\sqrt{8}m/s$ 나와.

S25: 가속도 $0.5m/s^2$ 맞지 않나...?

S23: 그러면 가속도가 일단 $0.5m/s^2$ 이고

S26: $0.5m/s^2$ 인데 내가 그래프를 그렸거든?

S23: 나도 그렇게 했어.

(중략)

S23: 그니까 $4\sqrt{2}$ 나왔어. 난 t 가.

S26: 그니까 $4\sqrt{2}$ 가. 나도 나와 가지고. v 가 $2\sqrt{2}m/s$ 나왔어.

S23: 거기까지는 우리가 틀린 건 아닌 거 같아.

(중략)

S23: 설마 이거냐?(활동지를 가리키며) 설마 이게 포인트는 아니겠지?

S25: 아 근데 이거(힘) 증가시키니까. 여기서 10N이라고 했으니까 똑같으니까 딱 가는 거 아닌가? 가속도가 $0.5m/s^2$ 인데.

S23: 아 5번 문제 초기 상황이었네 이게..(학습지를 넘기며)이거 이거...

S1 : 아 E번 나온다...마찰력 계산하면 E번 나와.

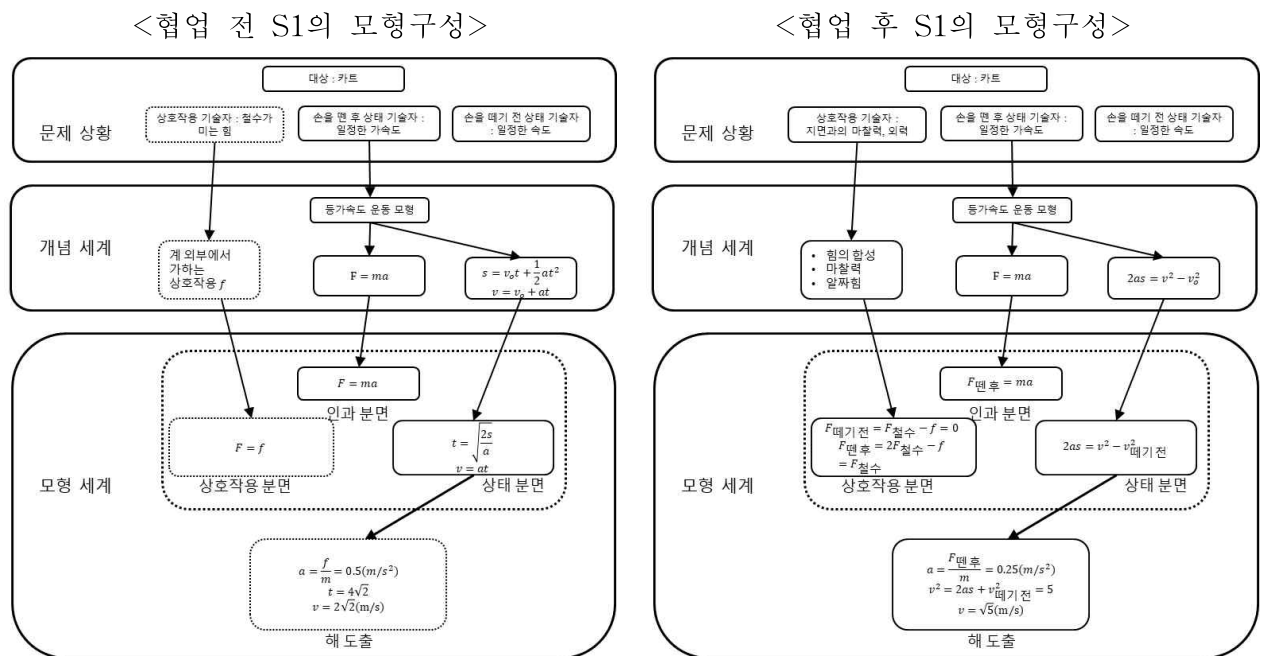
S25: 답이 무엇으로 나왔어?

S1 : $\sqrt{5}m/s$ 나와 마찰력 계산하면... 마찰력까지 계산하면. 이게 가속도가 $1/4m/s^2$ 이 되거든...

S25: 마찰력이 있었어...몰랐어...왜 이상하더라...

6번 문항 6조는 A2 모형을 구성한 참여자가 3명(S1, S23, S26)이 있었으나 모형의 해가 보기에 없었으므로 이들은 자신의 모형이 대응되었다고 판단하지 않았다. 유일한 A1 유형인 S25도 상태 분면을 구성하지 못

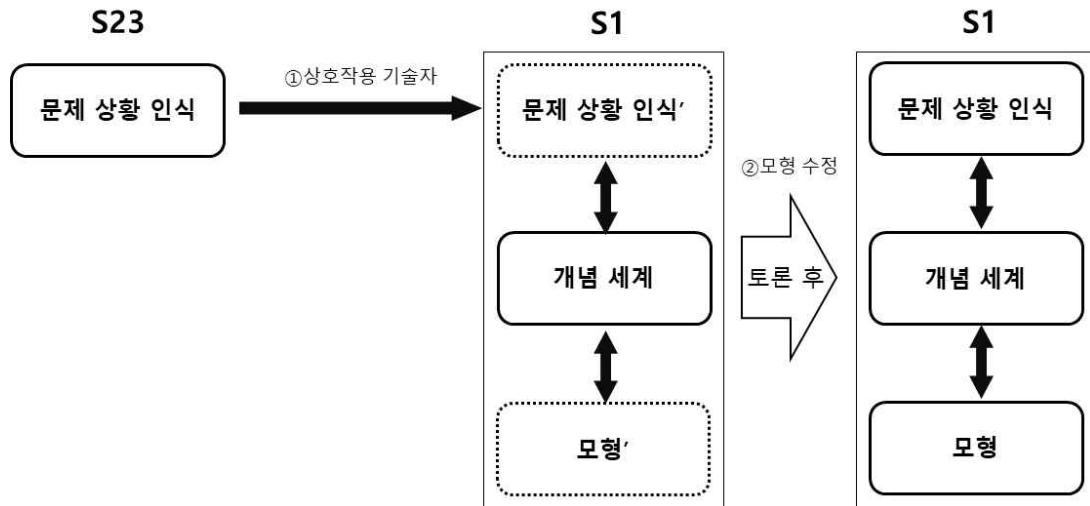
했다는 점을 제외하면 위의 3명과 유사하였다. 담화 초기부터 이들은 적극적으로 자신의 모형과 문제 상황 인식을 공유하며 모형을 구성하고자 하였다. 이들은 공통적으로 카트에 작용하는 마찰력을 인지하지 못하고 철수가 미는 힘만이 외력이라고 인식하고 있었다[그림 4-41]. 카트에 마찰력이 작용하지 않았다면 이들의 모형은 문제 상황과 일관된 것이므로 담화 초기 6조의 모둠원들은 자신들의 모형구성에서 어떤 문제가 있었는지 파악하지 못하였다. 그러나 S23이 문제 상황의 중요한 조건을 지적하면서 모형구성의 전환점을 맞게 된다. S23이 6번 문항이 5번 문항의 초기 상황에서부터 사건이 진행된다는 점을 발견하고 이를 알리자, S1은 카트에 마찰력이 작용하고 있음을 인지하고 모형을 수정하였다.



[그림 4-41] 협업에 참여한 S1의 모형구성 변화

[그림 4-42]는 S23이 문제 상황 인식의 문제점을 찾아내어 이를 공유하고 S1이 모형을 수정하는 과정을 도식화한 것이다. S1은 놓치고 있던

상호작용 기술자를 S23과의 문제 상황 인식의 상호작용을 통해 인지하고 (①) 이를 상호작용 분면에 적용하여 모형을 수정하였다(②).



[그림 4-42] 협업에 참여한 S23과 S21의 상호작용과 모형구성 변화

협업 유형에서 모형의 수정은 Clement(1989, 2008)의 GEM 순환과 상당히 유사하다. GEM 순환은 초기 모형이 비판을 수용하여 수정되는 절차를 거쳐 더욱 복잡하고 정교한 일련의 모형들을 고안해가는 과정으로 본 연구의 6번 문항 6조 사례에서 모두의 모형이 GEM 순환 과정을 거쳐 발달되는 것을 확인할 수 있었다. Clement(1989, 2008)의 GEM 순환 과정은 실험 데이터나 경험적 사실을 기반으로 모형을 평가하고 수정하는 것을 의미하지만 물리 문제해결에서는 동료와의 상호작용을 통해 모형이 수정됨을 확인되었다. 구체적으로 6번 문항 6조의 사례에서는 문제 상황 인식 간의 상호작용이 모형 수정에 핵심적인 역할을 하였다. 참여자들의 타당하지 않은 문제 상황 인식은 개념 세계의 결핍이 아니라 문항 제시문에 대한 이해 부족 탓이었다. 따라서 위 사례에서 개념 세계의 상호작용이나 개념 세계 변화는 관찰되지 않았다.

반면 참여자들이 타당한 모형구성에 실패한 이유가 개념 세계의 결핍에서 기인할 경우 협업을 통해 개념 세계의 보완이 이뤄져야만 타당한

모형구성이 가능할 것이다. 12번 문항 5조의 사례를 통해 이에 대해 논의하겠다.

S29: 그니까 이거 넓이가 뭘 의미해?

S7 : 운동량 아니야?

S29: 50 곱하기 10해가지고, F가 500이야. $F=ma$ 인데 500이야. 근데 여기서 넓이가 400이란 말이란 말이야. 그래서 여기서 400이고, 여기까지가 400이면 여기는 100일꺼란 말이야. 100N이. 그래서 100N은 50 곱하기 x해가지고, x는 2가 나왔지.

S20: a는 그니까 가속도가 a라는 거잖아?

S7 : 야 가속도가 2, 관련이 없잖아?

(중략)

S7 : 야 운동량 그거 속도랑 질량으로 하는 거 있지 않냐?

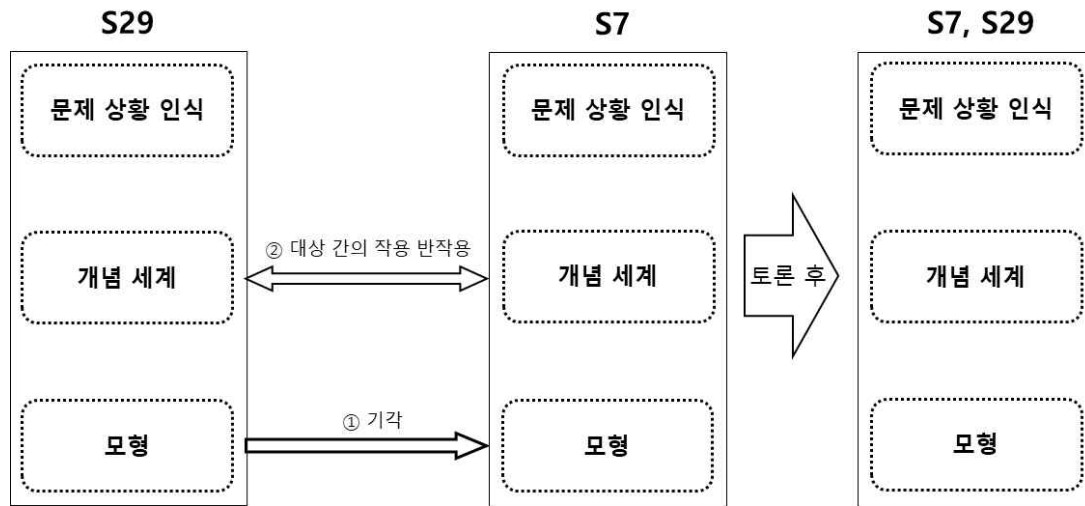
S29: 모르겠다.

S7: 그 Ns말고 이거 말고 하나 더 있었는데 기억이 안나. 이거 식 변형해가지고 mv로 나타낸 거 있거든?... Δmv 같아.

위 사례에서 S29는 ID, S7과 S20은 IG 유형의 참여자들이었다. S29는 운동 2법칙에 임의적으로 변인을 대입하여 나름대로 해를 도출했지만 S7에 의해 즉각적으로 기각되었다. S7은 등가속도 운동 모형으로는 모형을 구성할 수 없음을 알고 충격에 의한 운동 모형을 적용하기 위해 관련 지식을 동료들과 공유하고자 하였으나 결국 모형을 구성하지 못했다.

[그림 4-43]에 위 담화에서 모형구성 요소의 상호작용을 도식화하였다. S29의 모형이 S7에 의해 기각된 이후(①) S7과 S29 사이에 충격에 의한 운동 모형과 관련된 질의응답에서 개념 세계간의 상호작용이 짧게나마 이뤄짐을 확인할 수 있다(②). 그러나 S7은 S29와의 상호작용에서 개념적 결핍을 보완하지 못하고 스스로 관련 지식의 일부를 상기하긴 했으나 결국 모형을 생성하지는 못하였다. 이 사례를 통해 ID, IG 유형의 참여자들 간의 협업이 모형을 구성할 수 있을 정도로의 개념 세계 보완은 매우

어려운 것으로 보인다.



[그림 4-43] 협업에 참여한 S29와 S7의 상호작용과 모형구성 변화

또한 위 사례에서 주목할 만한 부분은 문제 상황 인식의 상호작용이 관찰되지 않았다는 것이다. 문제에서 제시하고 있는 가속도 그래프를 해석하여 대상의 상태와 상호작용에 대한 논의는 찾아보기 어려우며 임의적인 수학적 조작의 결과나 공식과 같은 단편적인 지식에 대한 언급이 있을 뿐이다. 즉, 문제 상황 인식에 대한 공유 없이 공식을 조합하여 답을 찾는데 주력하고 있었던 것이다. 이와 같이 적합한 개념 모형을 선택하여 모형의 분면을 구성한 모둠원이 없는 모둠에서 참여자간의 협업만으로 모형을 구성한 사례는 본 연구에서 단 한건도 찾을 수 없었다.

12번 문항 5조의 사례를 통해 개념 모형의 개념 도식이 충분히 형성되어 있지 않은 참여자들 간에는 개념 도식의 공유가 원활하지 않고 문제 상황 인식에 대해서도 유의미한 상호작용이 일어나기 어려움을 확인할 수 있었다.

두 사례에 대한 논의를 종합하면 협업을 통해 새로운 모형을 구성할 수 있다는 점은 문제해결에서 소집단 상호작용이 단순한 지식의 전수 이상의 의미가 있음을 알 수 있다. 그러나 전체 협업 유형 중에서 새로운 모형구성에 성공한 사례는 절반에 불과했으며 모두 A2의 모형을 일부

수정하는 방식이었다는 점은 협업이 모형구성에 기여하는 바는 제한적인 임을 의미한다. 즉, 개념 모형에 대한 지식을 가진 참여자들이 문제 상황 인식을 수정하고 이를 모형에 반영하는 것은 가능하지만 그렇지 못한 참여자들이 협업을 통해 새로운 모형을 구성해내는 것은 상당히 어려운 과제를 확인할 수 있었다.

4.3.4. 양립성 확인

양립성 확인에서 참여자들은 상대방의 모형을 평가하고 비판하기 보다는 모형 간의 유사성과 차이점을 식별하는 방식으로 상호작용이 진행된다. 본 절에서는 양립성 확인에서 모형구성 요소의 상호작용이 참여자들의 모형구성에 어떻게 기여하는지 탐색하고자 한다. 이를 위해 타당한 모형을 구성한 A4 유형 참여자들 간의 소집단 상호작용을 분석하고자 한다. 다음은 각기 다른 개념 모형을 선택하여 모형을 구성한 6번 문항 4조 S21(A4)과 S9(A4)의 담화이다.

S21: 이거를 아까 그냥 초기상황이라 해서. 마찰력 이거 했거든?
 그래서 이거(알짜힘)를 5N이라 간단히 생각했어. 일과 에너지로 해가지고 이거 5N으로 8m 갔으니까. 이 식 써가지고 40J이잖아. 40J에 $\frac{1}{2}mv^2$. 처음 속력이 1이니까 이렇게 하면...(중략) $v=\sqrt{5}$ 나와.

S9 : 일과 에너지 쓴 거야? 난 등가속도 썼는데

S21: 난 일과 에너지 썼어.

S9 : 그거 뭐지? 그 원래 아까는 -5N이 작용했으니까. 애는 애가 등가속도 운동 했을 힘이 5N이잖아. $F=ma$ 에서 (질량) 20이고 5N이니까. a 가 1/4이고. $2as = v^2 - v_0^2$ 해서 이게 1이고? v 지금 이걸로 구할 거잖아

S21: 응

S9 : 여기가 1/4에 8이니까 4고

S21: $F=ma...$

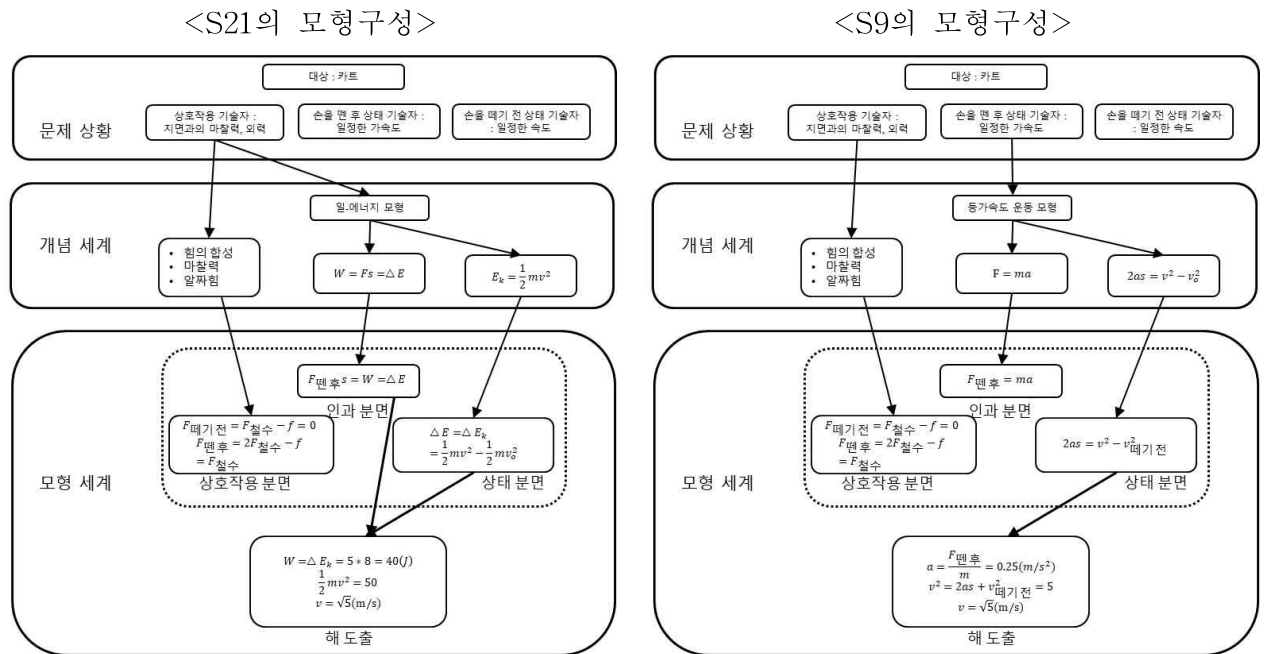
S9 : (21번에게)난 네 것을 쓰겠어. 일이 뭐라고 했어? 운동에너지?
지?

S21: 어어 일-에너지랑 운동에너지가 같다.

S9 : 아아 아니다(학습지를 가리키며). 이때 운동에너지랑 이때
운동에너지 차가 이거라고 했지?

S21: (끄덕끄덕)

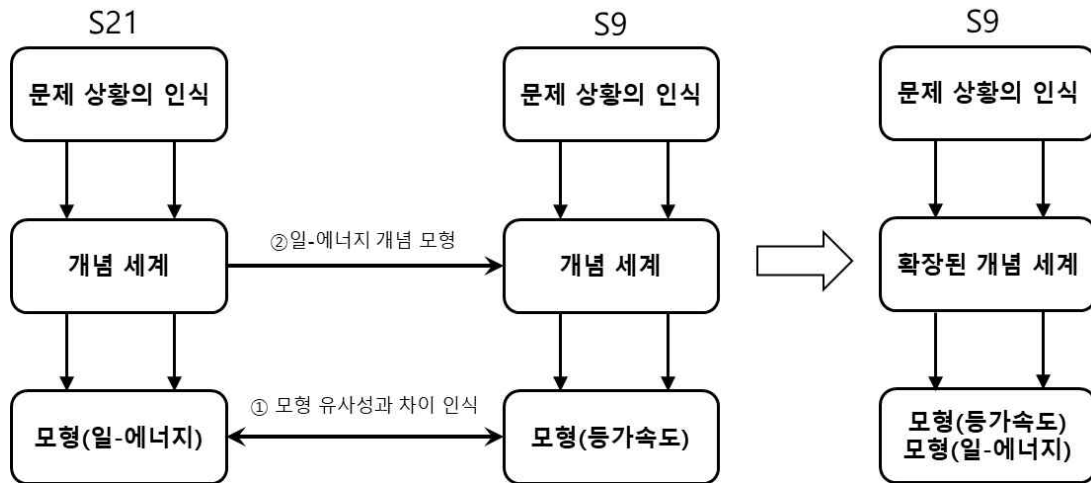
두 참여자의 모형구성을 [그림 4-44]에 도식화하였다. S21은 일-에너지 모형, S9는 등가속도 운동 모형을 선택하여 모형을 구성했다.



[그림 4-44] 양립성 확인에 참여한 S21과 S9의 모형구성 비교

두 참여자는 차례대로 자신의 문제 상황 인식과 모형을 상세히 제시하며 모형의 유사성과 차이를 인식해가고 있다([그림 4-45의 ①]). 두 참여자의 기술자 식별은 동일하였으며 상이한 개념 모형을 선택하였으므로 인과 분면과 상태 분면에서 차이를 보였다. S9는 S21의 모형을 수동적으로

로 확인하는데 그치지 않고 직접적으로 일-에너지 모형에 대해 묻고 있다. 즉, S9는 S21과의 개념 세계 상호작용을 통해 일-에너지 모형의 개념 도식을 자신의 개념 세계에 추가하였다(②).



[그림 4-45] 양립성 확인에 참여한 S21과 S9의 상호작용과 모형구성 변화

6번 문항 4조에서 S9는 모형의 양립성을 확인하는데 그치지 않고 모형이 기반이 되는 개념 모형에 대해 적극적으로 질문함으로써 개념 세계의 확장을 경험할 수 있었다. 즉 양립성 확인은 다른 개념 모형을 선택한 동료의 모형을 접함으로써 참여자의 개념 세계와 모형이 확장되는 방식으로 모형구성에 기여할 수 있는 것이다.

그러나 양립성 확인에서 S9와 같은 긍정적인 사례가 늘 관찰되는 사례는 많지 않았다. 오히려 동료의 상이한 모형을 접하고 개념 모형에 관해 적극적으로 질의 응답하지 않았으며 개념 모형의 차이에서 오는 모형 간의 차이점과 유사성에 대해서도 논의하지 않는 경우가 많았다. 다음은 이러한 소극적인 양립성 확인의 대표적인 사례인 1번 문항 6조의 담화이다.

S28: 그 역학적 에너지 그걸로 했는데. 떨어지기 전에는 mgh 고
 지면에 닿을 때 에너지는 $\frac{1}{2}mv^2$ 인데 높이가 두 배가 되면
 속도는 거기 $\sqrt{2}$ 배가 되거든? 그래 가지고. 가속도는 일정
 한데 속도는 시간에 비례하니까 $\sqrt{2}$ 초.

S14: 나는 일단 하나는 그래프로 했고 하나는 평균속도로 했거
 든? 둘 다 결과적으로 똑같은 방법인데 평균속도는 0초에
 서 $10t$ 초까지 가니까 둘이 합쳐서 $1/2$ 나누면 $5t$ 야. $t \times 5t$
 하고... 그래서 그걸 거기를 10으로 하면은. t^2 은 2 나오니까.
 $t = \sqrt{2}$.

S30: 아~

S5: 어쨌든 간에 속도 시간 그래프를 그리면 아래 면적이 h 일거
 아니야. 첫 번째 실험에서 근데 그 때 t 가 1이니까. 이번에는
 두 배... $2h$ 높이에서 떨어트리면 넓이가 두 배가 되는 거잖아.
 삼각형을 잘 이용하면 당연히 각 변의 길이가 $\sqrt{2}$ 배가 될
 수밖에 없어.

S28은 중력장에서의 역학적 에너지 보존을, S14와 S5는 등가속도 운동 모형을 선택하여 모형을 구성했다. 참여자들은 상이한 개념 모형에 관해 적극적으로 질의 응답하지 않았으며 개념 모형의 차이에서 오는 모형 간의 차이점과 유사성에 대해서도 논의하지 않고 있다. 연구자의 해석으로는 모형에서 물리적인 오류가 발견되지 않는 한 참여자들은 다른 모듈원의 모형과 자신의 모형을 비교하거나 대조하는데 소극적인 것으로 판단된다. 즉 참여자들은 모형의 옳고 그름에 대해서는 적극적으로 판단하고 논쟁하지만 왜 복수의 모형이 양립할 수 있으며 어떤 측면이 다른가에 대해서는 그다지 흥미를 못 느끼고 있는 것이다. 이는 선행 연구에서 지적하고 있듯이 많은 참여자들이 문제의 정답을 찾는 것에 많은 의미를 부여하고 정작 문제가 갖는 물리적인 의미에 대해서는 무관심한 태도(Uden *et al.*, 2012; Balta *et al.* 2016; Niss, 2012, 2017)를 보이기 때문이다. 양립성 확인 21건 중에서 위 사례와 같이 모형만을 확

인한 사례가 16건(76.2%)로 나타나 본 연구의 양립성 확인은 모형구성에 상당히 제한적으로 기여한다고 볼 수 있다.

양립성 확인에 대한 두 사례의 논의를 종합하면 다음과 같다. 양립성 확인은 다른 상호작용 유형과 달리 참여자의 문제 상황 인식이나 개념 세계를 수정하기 보다는 개념 세계와 모형을 확장하는 방식으로 모형구성에 기여할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 이를 위해서는 참여자들이 상이한 모형을 확인하는데 그치지 않고 모형의 양립가능성이 물리적으로 무엇을 의미하는가에 대한 개념적인 논의가 이어져야 한다. 그러나 본 연구의 결과는 이러한 논의가 늘 자발적으로 이뤄지지 않았음을 보여주고 있다. 따라서 양립성 확인에서 참여자들 간의 의미 있는 소집단 상호작용을 유도하기 위해 교수 방안이 요구된다.

5. 결론

5.1. 요약

뉴턴 역학은 물리학의 모든 다른 영역에서 적용되는 주요 도구를 정의하고 보편적인 방법을 제공한다는 점에서 물리 학습에서 매우 중요한 의미를 가진다. 고등학생들은 뉴턴 역학의 수학적 표현과 법칙의 적용 방법을 학습하기 위해 정량적인 문제해결을 주요 학습 전략으로 삼고 있다. 그러나 많은 학생들이 문제해결 과정을 통해 뉴턴 역학의 기본 원리를 이해하기 보다는 수학적 계산과정을 익히는데 주력하여 물리 이론에 관한 이해는 물론 흥미도 떨어지고 있는 실정이다.

이러한 학생들의 물리 문제해결에 관한 어려움을 극복하기 도입된 시도 중에서 동료와의 협업은 다양한 측면에서 그 효용성을 입증해왔다. 그러나 대다수의 연구들이 정량적인 검사 결과에 치중하여 학생들의 소집단 상호작용이 학습에 미치는 영향에 대한 질적인 분석은 부족하였다.

이에 본 연구는 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 동료와의 상호작용이 학생의 모형구성에 미치는 영향을 질적으로 탐색하여 학생의 학습에서 동료교수의 역할과 제한점에 대한 시사점을 제안하고자 한다. 이를 위해 뉴턴 역학 문제에 대한 모형구성에서 고등학생들이 겪는 어려움은 무엇이고, 문제해결을 위한 소집단 상호작용은 어떠한 양상으로 진행되며, 소집단 상호작용이 학생들의 모형구성에 미치는 영향은 어떠한지를 분석하였다

먼저 문헌 연구를 통해 뉴턴 역학의 문제해결에 관한 지식 구조를 정의하고, 모형구성의 관점에서 물리 문제해결을 재해석하여 모형구성의 분석틀을 제안하였다. 그리고 학생들의 소집단 상호작용을 문제 상황 인식, 개념 세계, 모형 세 요소로 세분화하여 소집단 상호작용이 모형구성에 미치는 영향을 심도 있게 기술하고자 하였다.

자료 수집을 위해 서울시에 소재한 일반계 고등학교의 남학생 32명을 대상으로 90분씩 2차시 동안의 동료교수 수업을 진행하였다. 고등학교 물리 I의 교육과정과 뉴턴 역학의 지식 구조를 반영하여 수업에서 사용할 12개의 문항을 개발하였다. 참여자들이 모둠별로 모여서 토론을 하는 장면은 캠코더를 이용하여 녹화되었으며, 총 95건의 담화가 전사되었다. 또한 참여자들이 작성한 활동지와 관찰 일지 등이 분석 자료로 활용되었다.

각 연구 문제에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

물리 문제에 대한 모형구성의 인지적 과정인 문제 상황 인식, 개념 세계 인출, 모형 생성 등의 하위 범주인 기술자 식별, 개념 모형 선택, 분면 형성, 수학적 조작 및 타당화로 분석틀을 구성하여 참여자들의 모형구성을 유형화하였다. 응답 I에서 총 12개 문항에 대한 372건의 모형구성 사례가 6가지 유형으로 범주화되었으며 각 유형은 다음과 같다. 모형의 모든 분면을 타당하게 구성(37.9%), 모든 분면을 타당하게 구성하였으나 수학적 조작에서 오류를 범함(0.5%), 모든 분면을 구성하였으나 일부 분면의 타당성 결여(24.2%), 일부 분면만을 구성(11.6%), 부적절한 개념 모형 선택(4.0%), 직관이나 추측에 의한 해의 선택(14.5%) 등이다. 유형화가 불가능한 사례는 27건이었다. 각 문항별로 동일한 유형의 모형구성을 한 참여자들의 일관된 특징을 식별하여 모형구성에서의 어려움을 분석한 결과, 기술자 식별에서 참여자들은 문제 상황을 오인하거나 명시되지 않은 상호작용 기술자를 식별하는데 어려움을 겪고 있는 것으로 나타났다. 또한 일부 참여자들은 문제 상황과 개념 모형 간의 동질성에 대한 숙고 없이 익숙한 개념 모형을 임의로 선택하기도 하였다. 모형 생성 단계에서 참여자들은 계의 설정, 즉 대상과 동인의 구분에 대한 명확한 기준을 갖고 있지 않아 어떤 상호작용 기술자를 인과 분면 구성에 적용할 것인가에 대해 혼란스러워했다. 또한 모형구성의 각 단계에서 계의 설정을 달리 하는 경향도 확인할 수 있었다. 상태 분면 구성에서 일부 참여자들은 상태 기술자 간의 관계에 대한 공식을 떠올리지 못하거나 복잡

인 상황을 기술하는데 어려움을 보였다. 마지막으로 모형이 타당하지 않더라도 자신의 해가 보기에 있으면 참여자들은 자신의 모형이 타당하다고 판단하고 있음을 확인할 수 있었다.

뉴턴 역학 문제해결에 관한 어려움을 극복하기 위해 참여자들이 어떤 방식으로 상호작용 하는지를 기술하고자 참여자들의 소집단 상호작용을 유형화하였다. 소집단 상호작용은 대응된 모형의 수, 모듈원들의 역할, 개념 모형의 동질성, 모형의 변화를 기준으로 튜터링, 경쟁, 협업, 양립성 확인의 네 가지 유형으로 세분화되었다. 총 118건의 소집단 상호작용은 피교수자 역할을 하는 참여자가 교수자 역할을 하는 참여자의 모형을 일방적으로 수용하는 튜터링(54.2%), 상이한 구조의 모형을 생성한 참여자들이 대등한 입장에서 서로의 모형을 평가하고 합의를 시도하는 경쟁(17.8%), 문제 상황과 모형에 관한 정보를 공유함으로써 공동으로 모형을 수정하거나 새로운 모형의 구성을 시도하는 협업(10.1%), 대응된 모형을 구성한 참여자들이 모형들의 타당성을 인정하고 유사성과 차이점을 확인하는 양립성 확인(17.8%) 등의 양상으로 분류되었다. 튜터링은 대부분의 문항에서 가장 높은 빈도로 나타났으며 경쟁은 명시되지 않은 상호작용을 인식하고 복수의 대상을 계로 설정하는 문항에서 상대적으로 비중이 높았다. 협업은 가장 저조한 빈도를 보였으며 모형을 생성하지 못한 참여자들의 비중이 큰 문항에서 상대적으로 자주 관찰되었으며, 양립성 확인은 정답률이 높은 문항에서 비중이 컸다.

소집단 상호작용에서 문제 상황, 개념 세계 및 모형에 대한 상호작용이 참여자들의 모형구성에 미치는 영향을 사례 분석하였다. A4가 A2나 A1을 대상으로 하는 튜터링에서 피교수자들은 교수자의 모형과 문제 상황 인식을 수용하는 과정을 통해 자신이 구성한 모형구성의 문제점을 인지하고 이를 수정하는 것으로 나타났다. 단, 피교수자의 타당하지 않은 모형구성 원인이 수학적 조작의 실수나 문제 상황에 대한 오인이 아니라 개념 세계의 결핍이나 모순에서 기인하는 경우 개념 세계 간의 상호작용이 뒷받침되어야 개념 세계의 보완이 가능한 것으로 확인되었다. 또한

선택된 개념 모형에 관한 개념 도식이 충분히 형성되지 않은 피교수자는 튜터링을 통해 자신의 개념 세계를 보완하지 못하고 모형의 결과만을 수용함으로써 일관된 모형구성에 실패하는 경우가 많았다.

경쟁에서 참여자들이 모형을 합의한 경우 튜터링과 유사한 형태로 모형구성 요소 간의 상호작용과 모형의 변화가 확인되었다. 그러나 참여자들의 역할이 더욱 적극적으로 자신의 모형과 문제 상황 인식, 개념 세계를 명시적으로 노출한다는 점에서 경쟁은 튜터링 보다 역동적이고 능동적으로 참여자의 모형구성에 기여한다고 볼 수 있다. 반면 경쟁에서 개념 세계에 대한 상호작용이 일어나지 않는 경우 참여자들은 합의에 이르지 않고 자신의 모형을 고수하여 모형구성의 의미 있는 변화를 관찰하기 어려웠다. 협업에서 A2 유형의 참여자들은 문제 상황 인식 간의 상호작용을 통해 기존 모형의 문제점을 찾고 이를 수정하였다. 그러나 개념 모형에 관한 개념 도식이 부족한 ID나 IG 유형의 참여자들의 경우 대부분 협업을 통해 모형을 생성해내지 못하였다. 따라서 협업이 모형구성에 기여할 수 있는 대상은 상당히 제한적임을 알 수 있었다. 마지막으로 양립성 확인은 다른 상호작용 유형과 달리 참여자의 문제 상황 인식이나 개념 세계를 수정하는 것이 아니라 개념 세계와 모형을 확장하는 방식으로 모형구성에 기여할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 양립성 확인의 이러한 가능성에도 불구하고 많은 참여자들이 다른 개념 모형을 선택한 모형을 확인만하고 개념 모형이나 모형의 양립성에 대한 심도 있는 논의를 진행하지 않았다.

5.2. 결론 및 제언

연구 결과를 종합하면 역학 문제해결에 대한 동료교수 활동에서 참여자들은 동료참여자의 문제 상황 인식 또는 모형을 수용, 평가, 공유하는 등의 소집단 상호작용을 통해 자신의 모형을 수정하거나 생성하는데 도움을 받는다고 할 수 있다. 그러나 개념 모형에 대한 참여자들의 이해가 현저히 부족하거나 개념적인 논의가 생략된 채 모형의 결과와 단편적인 지식만이 일방적으로 전달되면 소집단 상호작용은 단지 수학적 계산과정을 전수하는데 그칠 개연성이 높다. 이러한 양상의 문제해결 경험이 반복된다면 학생들은 물리 문제해결을 통해 물리 이론에 대한 이해의 폭을 넓혀가지 못한 채 수학적 계산과정에만 익숙해져갈 것이다.

이는 동료와의 상호작용이 학생들의 물리학습에 더욱 의미 있게 기여하기 위해서는 학생들이 동료의 모형구성을 수동적으로 수용하지 않고 적극적으로 질의 응답하여 모형과 개념 세계의 내적 연계성을 이해하는 것이 중요함을 시사한다. 즉, 모형의 수학적인 측면만이 아니라 모형이 기반하고 있는 개념 세계 요소들은 무엇이고, 어떤 개념 모형을 중심으로 조직되고 있으며, 문제 상황과의 연관성은 어떠한지를 이해해야 하는 것이다. 이를 위해 소집단 상호작용에서 학생들이 공식의 조합이나 계산 과정에만 주목하지 않고 과제의 물리적인 의미와 이론에 대해서도 논의하도록 하는 교수 방안이 요구된다고 할 수 있다.

구체적으로 교사가 학생들에게 개념 세계의 요소들이 과제의 문제 상황과 모형의 각 분면에 어떻게 연계되는지 논의하는 것에 대한 명시적인 지침을 제공하는 것도 하나의 방안으로 고려해볼 수 있다. 또한 학생들의 개념 세계를 보다 명확히 드러낼 수 있는 문항의 제작과 모둠 편성 방안들에 대한 세밀한 후속 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 곽영순. (2003). **질적연구로서 과학 수업비평: 수업비평의 이론과 실제**. 서울: 교육과학사.
- 교육과학기술부 (2011). **과학과 교육과정**. 교육과학기술부 고시 제 2011 - 361호. 별책 9.
- 권재술, & 이성왕. (1988). 물리문제해결 실패자(초심자)와 성공자(전문가)의 문제해결 사고과정에 관한 연구. **한국과학교육학회지**, 8(1), 43-55.
- 김종원, 김규환, 이지원, 황명수, & 김중복. (2012). 과학 교사 연수에서의 동료교수법의 효과및 교사의 인식. **과학교육연구지**, 36(1), 84-93.
- 김효남, & 노금자. (1996). 과학적 상황과 일상적 상황에 따른 초등학생들의 용해 개념. **초등과학교육**, 15(2), 233-250.
- 나장함. (2006). 질적 연구의 다양한 타당성에 대한 비교 분석 연구. **교육평가연구**, 19(1), 265-283.
- 류은희, 김중복, & 이정숙. (2012). 중학교 과학영재와 일반학생의 Peer Instruction 을 통한인지갈등: 문항의 난이도에 따른 비교를 중심으로. **영재교육연구**, 22(1).
- 박윤배. (1991). 역학 문제해결에 있어서의 오류 유형. **물리교육**, 9(1), 14-23.
- 박윤배, & 김미영. (2006). 협동해결과 개별해결에서 나타난 물리문제해결과정의 차이. **한국과학교육학회지**, 26(1), 114-121.
- 박학규, & 권재술. (1991). 물리 문제해결에 관한 최근 연구의 분석. **한국과학교육학회지**, 11(2),
- 박학규, & 이용현. (1993). 물리문제해결과정에서 중학생들의 사고과정의 특성 분석. **한국과학교육학회지**, 13(1), 31-47.

- 변태진. (2012). **House model을 이용한 학생들의 물리 문제해결 과정에 대한 이해**. 박사학위 논문. 서울대학교 대학원,
- 오필석. (2007). 연구논문 : 중등학교 지구과학 수업에서 과학적 모델의 활용 양상 분석: 대기 및 해양 지구과학 관련 수업을 중심으로. **한국과학교육학회지**, 27(7), 645-662.
- 이동욱. (2015). **중학생과 과학교사의 색 인식에 대한 개념세계 및 모형구성**. 박사학위 논문. 서울대학교 대학원,
- 이봉우, 김희경. (2006). 주제: 소외된 학생들을 위한 과학교육의 연구와 실천: 논문발표 2; 학생들이 물리를 재미없고 어렵다고 생각하는 이유에 대한 분석. **한국과학교육학회 학술발표 및 세미나집**, 67-77.
- 이신영, 김찬중, 최승언, 유준희, 박현주, 강은희, & 김희백. (2012). 소집단 상호작용에 따른 심장 내 혈액 흐름에 대한 소집단 모델 발달 유형과 추론 과정 탐색. **한국과학교육학회지**, 32(5), 805-822.
- 이지원, & 김중복. (2013). 과학영재들은 협업적 문제해결과정에서 무엇을 공유하는가? **영재교육연구**, 23(6), 1099-1115.
- 임준홍. (2014). **물리문제 풀이과정에서 나타나는 고등학교 학생들의 어려움 분석**. 박사학위 논문. 단국대학교 대학원.
- 장혜원. (2014). **한국의 인지적 숙련과 교육의 연계 연구**. 박사학위 논문, 한국교원대학교.
- 장혜원, & 김중복. (2017). 예비교사의 동료교수법 경험과 인식 탐구: 교양물리 사례를 중심으로. **한국교원교육연구**, 34(2), 311-334.
- 채동현. (2003). **과학 교육의 질적 접근**: 북스힐.
- Alexander, P. A., & Judy, J. E. (1988). The interaction of domain-specific and strategic knowledge in academic performance. *Review of Educational Research*, 58(4), 375.
- Alonzo, A. C., & Steedle, J. T. (2009). Developing and assessing a force and motion learning progression. *Science Education*,

93(3), 389–421.

- Angell, C., Guttersrud, Ø., Henriksen, E. K., & Isnes, A. (2004). Physics: Frightful, but fun. Pupils' and teachers' views of physics and physics teaching. *Science Education*, 88(5), 683–706.
- Bae, D., & Yoo, J. (2012). Middle School Students' Learning Progressions for Scientific Modeling Force and Motion. *New Physics: Sae Mulli*, 62(8), 809–825.
- Bing, T. J., & Redish, E. F. (2009). Analyzing problem solving using math in physics: Epistemological framing via warrants. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 5(2),
- Beichner, R. J. (1994). Testing student interpretation of kinematics graphs. *American Journal of Physics*, 62(8), 750–762.
- Bernardino Lopes, J., & Costa, N. (2007). The Evaluation of Modelling Competences: Difficulties and potentials for the learning of the sciences. *International Journal of Science Education*, 29(7), 811–851.
- Brewe, E. (2008). Modeling theory applied: Modeling Instruction in introductory physics. *American Journal of Physics*, 76(12), 1155–1160.
- Byun, T. I., & Lee, G. H. (2010). Toward understanding student difficulty in upper-level mechanics problem-solving processes. *The SNU Journal of Education Research*, 19, 145–165.
- Byun, T., & Lee, G. (2013). A New Approach to Physics Problem Solving by Focusing on the Development of the House Model. *New Physics: Sae Mulli*, 63(7), 745–755.
- Champagne, A. B., Klopfer, L. E., & Anderson, J. H. (1980). Factors

- influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics*, 48(12), 1074–1079.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50(1), 66–71.
- Clement, J., & Rea-Ramirez, M. A. (2008). *Model based learning and instruction in science*. New York : Springer.
- Cangelosi, J. S. (1990). *Designing tests for evaluating student achievement*. New York: Longman.
- Corben, H., & Stehle, P. (1960). *Classical mechanics*.(2nd ed.). New York: Wiley.
- Crouch, C. H., & Mazur, E. (2001). Peer instruction: Ten years of experience and results. *American Journal of Physics*, 69(9), 970–977.
- Damon, W., & Phelps, E. (1989). Critical distinctions among three approaches to peer education. *International journal of educational research*, 13(1), 9–19.
- de Ataíde, A. R. P., & Greca, I. M. (2013). Epistemic views of the relationship between physics and mathematics: Its influence on the approach of undergraduate students to problem solving. *Science & Education*, 22(6), 1405–1421.
- Duit, R., & Glynn, S. (1996). Mental modelling. *Research in science education in Europe*, 166–176.
- Enghag, M., Gustafsson, P., & Jonsson, G. (2007). From everyday life experiences to physics understanding occurring in small group work with context rich problems during introductory physics work at university. *Research in Science Education*, 37(4), 449–467.
- French, A. P. (1971). *Newtonian mechanics*. New York: W.W. Norton

& Company

- Galili, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International Journal of Science Education*, 17(3), 371–387.
- Giere, R. N. (1990). *Explaining Science : A Cognitive Approach (Vol. Pbk. ed)*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gilbert, J., & Watts, D. M. (1983). Concepts, Misconceptions and Alternative Conceptions: Changing Perspectives in Science Education. *Studies in Science Education*, 10, 61–98.
- Gilbert, J. K., Pietrocola, M., Zylbersztajn, A., & Franco, C. (2000). Science and education: Notions of reality, theory and model Developing models in science education. In J. K. Gillbert, C. J. Boilter (Eds.) *Developing Models in Science Education* (pp.19–40). London : Kluwer Academic Publisher
- Gilbert, John K. (2005). Visualization: *A metacognitive skill in science and science education Visualization in science education* (pp. 9–27). Dordrecht.: Springer.
- Greca, I. M., & Moreira, M. A. (2002). Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. *Science Education*, 86(1), 106–121.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53(11), 1056–1065.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1987). Modeling instruction in mechanics. *American Journal of Physics*, 55(5), 455–462.
- Halloun, I. A. (2006). *Modeling theory in science education* (Vol. 24). Dordrecht: Springer.
- Halloun, I. A. (2007). Mediated modeling in science education. *Science & Education*, 16(7), 653–697.

- Hammer, D. (1994). Epistemological beliefs in introductory physics. *Cognition and Instruction*, 12(2), 151-183.
- Harrison, A. G., & Treagust, David F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011-1026.
- Heller, P., Keith, R., & Anderson, S. (1992). Teaching problem solving through cooperative grouping. Part 1: Group versus individual problem solving. *American Journal of Physics*, 60(7), 627-636.
- Henderson, C., Yerushalmi, E., Kuo, V. H., Heller, P., & Heller, K. (2004). Grading student problem solutions: The challenge of sending a consistent message. *American Journal of Physics*, 72(2), 164-169.
- Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*, 55(5), 440-454.
- Hestenes, D., & Wells, M. (1992). A Mechanics baseline test. *The Physics Teacher*, 30(3), 159-166.
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141-158.
- Hofer, B. K. (2001). Personal epistemology research: Implications for learning and teaching. *Educational Psychology Review*, 13, 353 - 382.
- Hogan, K., Nastasi, B. K., & Pressley, M. (1999). Discourse Patterns and Collaborative Scientific Reasoning in Peer and Teacher-Guided Discussions. *Cognition and Instruction*, 17(4), 379 - 432.
- Hsu, L., Brewe, E., Foster, T. M., & Harper, K. A. (2004). Resource Letter RPS-1: Research in problem solving. *American Journal of Physics*, 72(9), 1147-1156.

- James, M. C., & Willoughby, S. (2011). Listening to student conversations during clicker questions: What you have not heard might surprise you! *American Journal of Physics*, 79(1), 123-132.
- Jang, H., Lasry, N., Miller, K., & Mazur, E. (2017). Collaborative exams: Cheating? Or learning? *American Journal of Physics*, 85(3), 223-227.
- Jeon, C., Lee, G., & Park, J. (2010). Student Difficulty in Learning Motion of a Particle in One Dimension in Upper-Level Mechanics: Focusing on the Sources and Resolutions of the Difficulties. *New Physics: Sae Mulli*, 60(11), 1185-1197.
- Jho, H. (2014). Literature Review of Students' Difficulties in Learning the Theory of Relativity. *New Physics: Sae Mulli*, 64(3), 281-289.
- Ji, Y., Cheong, Y. W., & Song, J. (2016). Characteristics of Undergraduate Students' Problem Solving the Law of Conservation in Mechanics with a Focus on Understanding the System. *New Physics: Sae Mulli*, 66(4), 422-433.
- Jin, S., & Yoo, J. (2014). Physics Majors' Perceptions of the Usefulness of Majoring in Physics for the Workplace. *New Physics: Sae Mulli*, 64(1), 35-45.
- Justi, R. S., & Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387.
- Karam, R. A. S. (2014). Framing the structural role of mathematics in physics lectures: A case study on electromagnetism. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 10(1),

010119.

- Kim, E., & Pak, S.-J. (2002). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *American Journal of Physics*, 70(7), 759–765.
- Kim, H. K., & Lee, B. W. (2006). Why Do Secondary Students Perceive Physics is Uninteresting and Difficult? *New Physics: Sae Mulli*, 52(6), 521–529.
- Kohl, P. B., & Finkelstein, N. D. (2008). Patterns of multiple representation use by experts and novices during physics problem solving. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 4(1), 010111.
- Larkin, J. H., & Reif, F. (1979). Understanding and teaching problem solving in physics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 191–203.
- Lasry, N., Mazur, E., & Watkins, J. (2008). Peer instruction: From Harvard to the two-year college. *American Journal of Physics*, 76(11), 1066–1069.
- Lee, I., & Yoo, J. (2017). How Does Peer Instruction Contribute to Learning Advancement in Solving Problems Involving Newton's Second Law? *New Phys.: Sae Mulli*, 67(11), 1327–1341.
- Lim, J., & Lee, B. (2015). Analysis of High School Students' Difficulties Related to Procedural Knowledge in Solving Classical Mechanics Problems. *New Physics: Sae Mulli*, 65(9), 888–899.
- McDaniel, M. A., Stoen, S. M., Frey, R. F., Markow, Z. E., Hynes, K. M., Zhao, J., & Cahill, M. J. (2016). Dissociative conceptual and quantitative problem solving outcomes across interactive

- engagement and traditional format introductory physics. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 12(2), 020141.
- Maloney, D. P. (1994). Research on problem solving: Physics, In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 327-354). New York : MacMillan.
- Mason, A., & Singh, C. (2010). Helping students learn effective problem solving strategies by reflecting with peers. *American Journal of Physics*, 78(7), 748-754.
- Mazur, E. (1997). *Peer instruction : a user's manual*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- National Research Council. (1996). *National Science Education Standards*. Washington, DC: National Academy Press.
- Nersessian, N. J. (1995). Should physicists preach what they practice? *Science & Education*, 4(3), 203-226.
- Nersessian, N. J. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. *Model-based reasoning in scientific discovery* (pp. 5-22). New York: Springer.
- Nguyen, D.-H., & Rebello, N. S. (2011). Students' difficulties with integration in electricity. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 7(1), 010113.
- Niss, M. (2012). Towards a conceptual framework for identifying student difficulties with solving Real-World Problems in Physics. *Latin-American Journal of Physics Education*, 6(1).
- Niss, M. (2017). Obstacles Related to Structuring for Mathematization Encountered by Students when Solving Physics Problems. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15(8), 1441-1462.

- Osborne, J. (1990). Sacred cows in physics – Towards a redefinition of physics education. *Physics Education*, 25, 189–196.
- Pepper, R. E., Chasteen, S. V., Pollock, S. J., & Perkins, K. K. (2012). Observations on student difficulties with mathematics in upper-division electricity and magnetism. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 8(1), 010111.
- Redish, E. F., Saul, J. M., & Steinberg, R. N. (1998). Student expectations in introductory physics. *American Journal of Physics*, 66(3), 212–224.
- Redish, E. F. (2006). *Problem solving and the use of math in physics courses*. Paper presented at Meeting of International Commission on Physics Education, Delhi, India.
- Redish, E. F., & Bing, T. J. (2009). *Using math in physics: Warrants and epistemological frames*. In D. Raine, C. Hurkett & L. Rogers (Eds.) *Physics community and cooperation*, Vol. 2. GIREP-EPEC & PHEC 2009 international conference, University of Leicester, Leicester , UK.
- Reif, F., & Heller, J. I. (1982). Knowledge structure and problem solving in physics. *Educational Psychologist*, 17(2), 102–127.
- Sawrey, B. A. (1990). Concept learning versus problem solving: Revisited. *Journal of Chemical. Education*, 67(3), 253.
- Schell, J., Lukoff, B., & Mazur, E. (2013). Catalyzing Learner Engagement using Cutting-Edge Classroom Response Systems in Higher Education. In *Increasing Student Engagement and Retention Using Classroom Technologies: Classroom Response Systems and Mediated Discourse Technologies* (pp. 233–261). Emerald Group Publishing Limited.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A.,

- Fortus, D., Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.
- Sherin, B. (2006). Common sense clarified: The role of intuitive knowledge in physics problem solving. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(6), 535-555.
- Simon, H. A., & Newell, A. (1971). Human problem solving: The state of the theory in 1970. *American Psychologist*, 26(2), 145.
- Smith, M. K., Wood, W. B., Adams, W. K., Wieman, C., Knight, J. K., Guild, N., & Su, T. T. (2009). Why peer discussion improves student performance on in-class concept questions. *Science*, 323(5910), 122-124.
- Stanic, G. M., & Kilpatrick, J. (1988). Historical perspectives on problem solving in the mathematics curriculum. In R. I. Charles & E. A. Silver (Eds.) *The teaching and assessing of mathematical problem solving* (Vol.3, p.1-22). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Tuminaro, J., & Redish, E. F. (2007). Elements of a cognitive model of physics problem solving: Epistemic games. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 3(2), 020101.
- Uhden, O., Karam, R., Pietrocola, M., & Pospiech, G. (2012). Modelling mathematical reasoning in physics education. *Science & Education*, 21(4), 485-506.
- Van Heuvelen, A. (1991). Learning to think like a physicist: A review of research based instructional strategies. *American Journal of Physics*, 59(10), 891-897.
- Watkins, J., & Mazur, E. (2010). Just in time teaching and peer

- instruction. In Scott, S. & Mark, M. (Eds.), *Just in Time Teaching: Across the Disciplines, and Across the Academy*. (pp.39-62). Sterling, VA: Stylus Publishing.
- Wood, A. K., Galloway, R. K., Hardy, J., & Sinclair, C. M. (2014). Analyzing learning during Peer Instruction dialogues: A resource activation framework. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 10(2). 020107.

부 록

[부록] 활동지

1. 질량이 1kg 인 물체가 지면으로부터 높이 h 인 지점에서 자유 낙하하여 지면과 충돌하는데 1초 걸렸다. 지면으로부터의 높이가 $2h$ 인 지점에서 질량이 2kg 인 물체가 자유 낙하할 때 물체가 지면과 충돌하는데 걸리는 시간은? (단, 공기와의 마찰은 무시하며, 중력가속도는 10m/s^2 이다.)
 A. 1초 B. $\sqrt{2}\text{초}$ C. 2초 D. $2\sqrt{2}\text{초}$ E. 4초

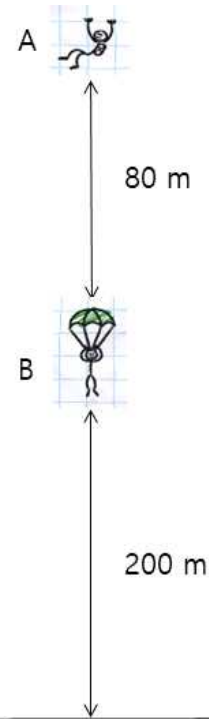
※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요

2. 그림은 공중에서 낙하하고 있는 두 사람을 나타낸 것이다. A는 어떠한 장비도 없이 자유낙하하고 있으며 B는 낙하산을 펴서 10m/s의 일정한 속력으로 낙하하고 있다.

A와 B 사이의 거리가 80m인 순간 A의 속력은 10m/s이고 B와 지면 사이의 거리는 200m이다. A와 B는 지면으로부터 몇 미터 상공에서 충돌하겠는가? (단, A에 작용하는 공기의 마찰력은 무시하며, 중력가속도는 10m/s^2 이다.)

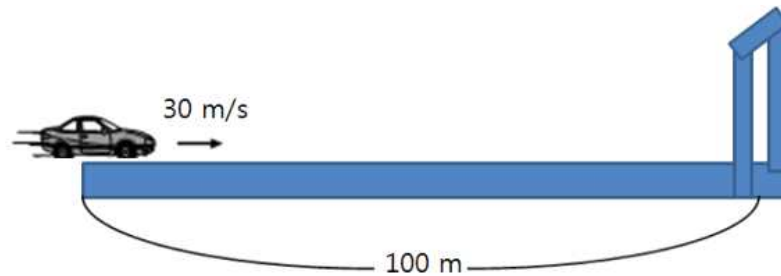
A. 40m B. 80m C. 100m D. 120m E. 160m



※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요

3. 그림은 직선 모양의 고속도로에서 30m/s의 일정한 속도로 달리고 있는 자동차의 운전자가 100m 전방에 있는 하이패스를 발견한 순간을 나타낸 것이다. 하이패스의 제한 속도는 10m/s이며 자동차의 질량은 1,000kg이다.



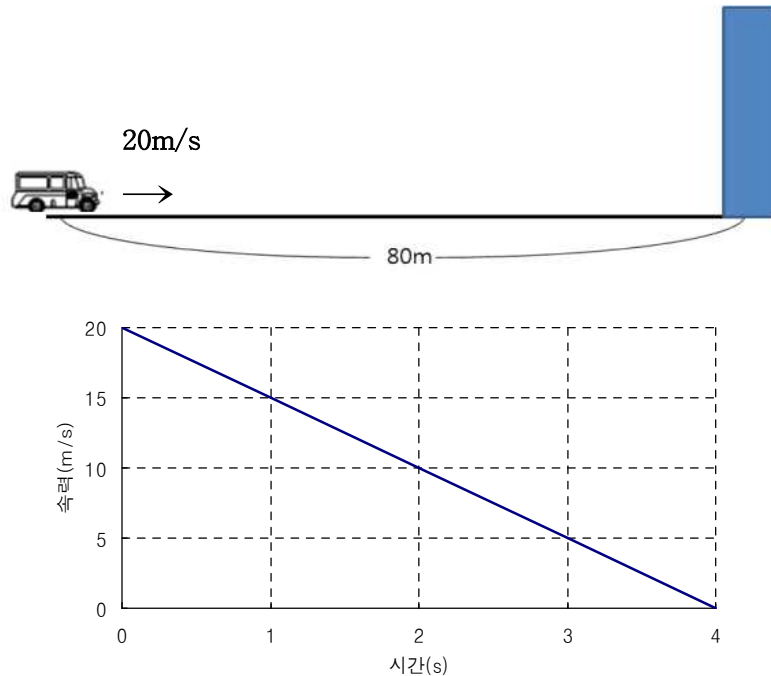
이 자동차의 브레이크가 낼 수 있는 최대 마찰력이 10,000N이라고 한다. 자동차가 하이패스를 10m/s의 속도로 통과하기 위해서는 하이패스를 발견한 순간부터 적어도 몇 초 안에 브레이크를 작동시켜야 하는가? (단, 브레이크가 작동하고 있는 동안 자동차에 작용하는 마찰력의 크기는 일정하며 자동차의 크기는 무시한다.)

A. 0초 B. 0.5초 C. 1초 D. 1.5초 E. 2초

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요

4. 그림은 물기가 없는 직선 도로에서 20m/s로 달리던 자동차가 전방 80m에 있는 벽을 발견한 순간을 나타낸 것이다. 운전자는 벽을 발견한 순간 브레이크를 밟아 자동차의 속력을 줄이기 시작했으며 그래프는 시간에 따른 자동차의 속력을 나타낸 것이다.



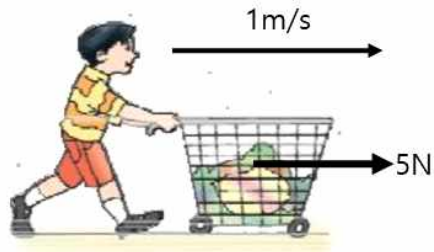
비가 오면 도로와 자동차 사이의 마찰력은 20% 감소한다고 한다. 비가 오는 날 위와 같은 상황이 벌어진다면 자동차는 벽으로부터 몇 m 떨어진 지점에서 멈추게 되는가? (단, 브레이크가 작동하고 있는 동안에 자동차에 작용하는 마찰력의 크기는 일정하며 자동차의 크기는 무시한다.)

A. 10m B. 20m C. 30m D. 40m E. 50m

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

5. 철수가 수평면에서 질량이 20kg인 카트를 5N의 힘으로 밀고 있다. 이때 카트는 1m/s의 일정한 속력으로 움직이고 있다.



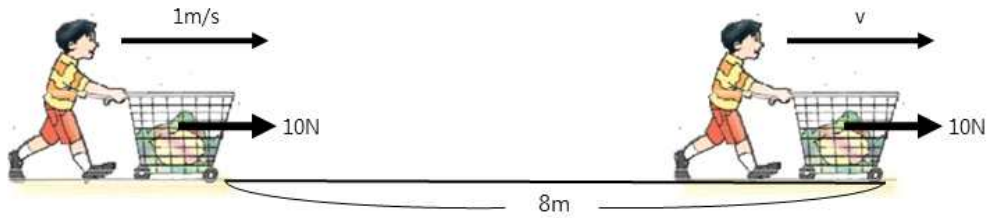
철수가 갑자기 카트에서 손을 떼어 더 이상 힘을 작용하지 않는다면 손을 떼는 순간부터 2초 뒤에 카트의 속력은? (단, 공기와의 마찰은 무시한다.)

A. 0m/s B. 0.2m/s C. 0.5m/s D. 0.8m/s E. 1.0m/s

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

6. 5번 문제의 초기 상황에서 철수가 카트 미는 힘을 10N으로 증가시켜 8m 밀었을 때 카트의 속도 v 는? (단, 공기와의 마찰은 무시하며 카트의 질량은 20kg이다.)

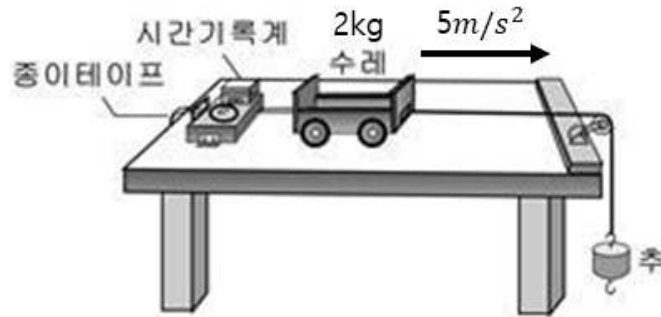


- A. $\sqrt{2}$ m/s B. $\sqrt{3}$ m/s C. 2m/s D. $\sqrt{5}$ m/s E. $\sqrt{7}$ m/s

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

7. 그림은 실험대 위에 시간기록계와 질량 2kg 인 역학용 수레, 고정 도르래를 장치하고 질량 1kg 인 추를 여러 개 매달아 수레의 가속도를 구하는 실험이다.



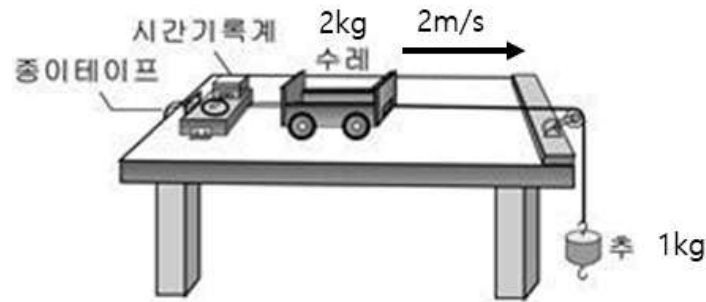
수레의 가속도가 5m/s^2 로 측정되었을 때 도르래에 매달린 추의 총 개수는?
(단, 모든 마찰은 무시하며 중력가속도는 10m/s^2 이다.)

A. 1개 B. 2개 C. 3개 D. 4개 E. 5개

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

8. 그림은 실험대 위에 시간기록계와 질량 2kg인 역학용 수레, 고정 도르래를 장치하고 질량 1kg인 추 1개를 연결한 상태를 나타낸 것이다. 수레는 현재 오른쪽으로 2m/s의 속도로 움직이고 있으며, 수레에 작용하는 마찰력의 크기는 1N이다.



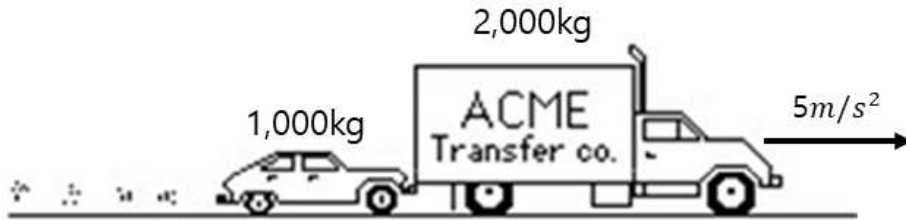
3초 뒤 수레의 속력은? (단, 공기와 도르래에서의 마찰은 무시하며, 중력가속도는 10 m/s^2 이다. 또한 실험대는 수레가 떨어지지 않을 정도로 충분히 길다고 가정한다.)

A. 5 m/s B. 8 m/s C. 11 m/s D. 12 m/s E. 17 m/s

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

9. 그림은 소형차가 고장 난 트럭을 오른쪽으로 밀고 있는 것을 나타낸 것이다. 소형차의 질량은 $1,000\text{kg}$ 이고 트럭의 질량은 $2,000\text{kg}$ 이다.



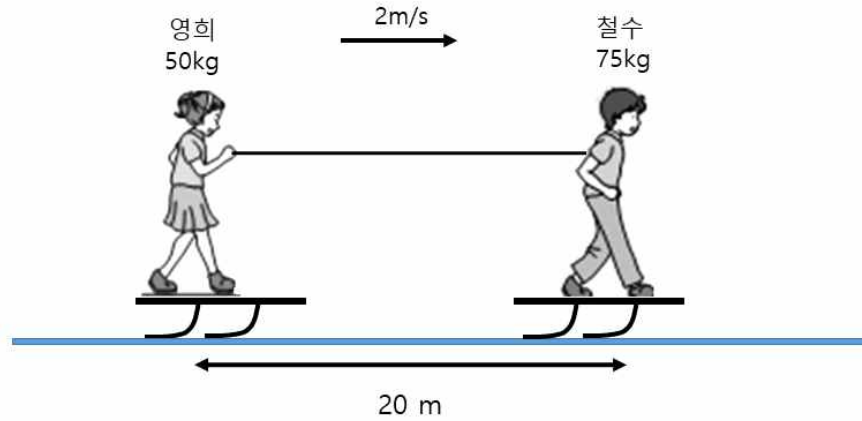
소형차와 트럭의 가속도가 5m/s^2 일 때 트럭이 소형차를 뒤로 미는 힘의 크기는? (단, 공기와 도로와의 마찰은 무시하고 두 자동차 사이에 작용하는 힘만 고려한다.)

A. 0N B. $5,000\text{N}$ C. $10,000\text{N}$ D. $15,000\text{N}$ E. $20,000\text{N}$

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

10. 그림은 철수와 영희가 줄로 연결된 상태로 빙판 위에서 썰매 타는 모습을 나타낸 것이다. 영희의 몸무게는 50kg, 철수의 몸무게는 75kg이며 오른쪽으로 2m/s의 속도로 움직이고 있다.



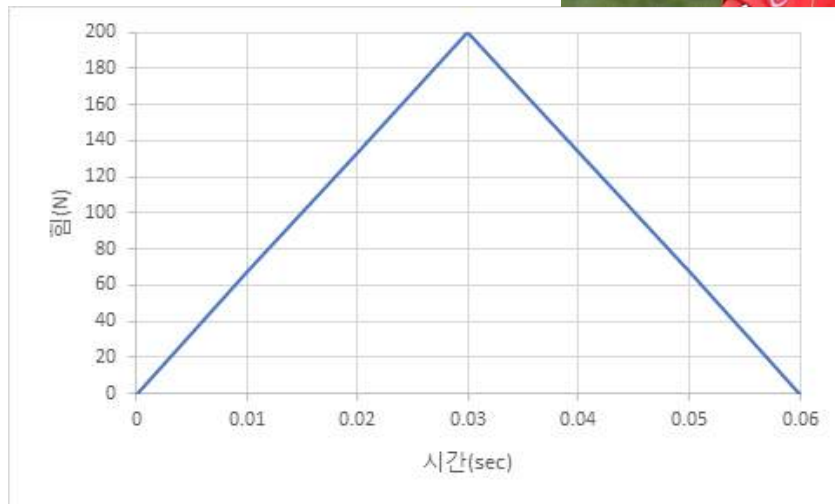
영희가 철수를 75N의 힘으로 왼쪽으로 계속 잡아당기면 둘은 몇 초 후에 만나겠는가?(단, 모든 마찰은 무시하며 사람의 몸 크기는 고려하지 않는다.)

A. 4초 B. $2\sqrt{5}$ 초 C. 5초 D. $\sqrt{30}$ 초 E. $2\sqrt{10}$ 초

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

11. 사진은 축구선수가 날아오는 공을 헤딩하는 장면을 포착한 것이다. 아래의 그래프는 축구선수가 공에 작용하는 힘을 시간에 따라 나타낸 것이다. 축구공의 질량은 0.5kg이다.



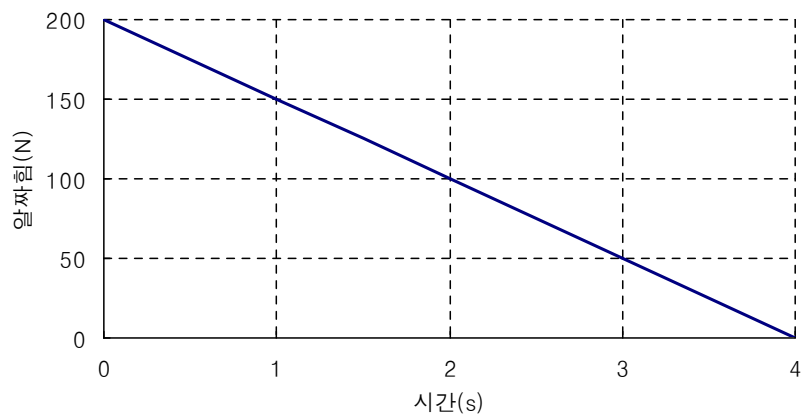
축구공이 축구선수와 충돌하기 직전의 속력이 8m/s일 때 축구공이 축구선수의 머리로부터 튕겨 나가는 순간의 속력은?

- A. 1 m/s B. 2 m/s C. 3 m/s D. 4 m/s E. 5 m/s

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

12. 그림의 자이로드롭은 자유 낙하하다가 지면으로부터 일정 높이에 도달하면 브레이크가 작동하여 안전하게 바닥에 도착하는 놀이기구이다. 그래프는 자이로드롭의 브레이크가 작동하기 시작하는 순간부터 자이로드롭이 바닥에 도착하여 멈출 때까지 탑승객인 영희에 작용하는 알짜힘의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. 영희의 몸무게는 50kg이다.



자이로드롭이 최고점에서 자유 낙하를 시작하여 브레이크가 작동할 때까지 걸리는 시간은? (단, 공기와의 마찰은 무시하며 중력가속도는 10 m/s^2 이다.)

A. 0.4초 B. 0.8초 C. 1.2초 D. 1.6초 E. 2초

※ 학생 본인의 풀이과정은 여기에 적어주세요.

※ 친구와의 토론 내용은 여기에 적어주세요.

Abstract

An Analysis of High School Students' Modeling and Small Group Interactions during Peer Instruction in Solving Mechanics

Lee, Il

Physics Education

The Graduate School

Seoul National University

Peer Instruction have been reported to contribute to students' concept change and achievement through several years of quantitative research. However, some researchers doubted that the positive effects of peer instruction were due to the unilateral transmission about the correct answer and interpretation, and that there is a need for qualitative research to reveal these issues. Recently, modeling theory in science teaching and learning provide a more qualitative view by understanding that solving the physical problems is a process of constructing system of explaining the problem

situations in the conceptual world. In particular, mechanics is a suitable subject to analyze from the viewpoint of modeling in terms of describing and predicting the motion of objects through a mathematical organization of various concepts and laws.

The purpose of this study is to suggest the implications of peer instruction's role and limitations in students' learning by qualitatively exploring the influence of peer interaction through modeling on mechanics problem solving activities. This study analyzed the difficulties of high school students in modeling the mechanics problem, the students' interaction during problem solving, and the effect of small group interactions on modeling.

A total of 32 high school students in Seoul were given 90-minute lessons twice. Twelve multiple choice items were constructed considering the Newtonian knowledge structure and Physics I curriculum. Participants individually solved the problem in the class and submitted the responses with classroom response system (Response I). The teacher grouped the students and made sure that a group has students with different responses. The participants discussed and submitted the individual responses (Response II). Peer discussions were recorded and 95 discourses were transcribed. Worksheets, transcripts and observation logs were utilized to ensure the validity of the analysis.

Participants' modeling were categorized by frameworks such as descriptor identification, conceptual model selection, facets formulation, mathematical manipulation, and validation which has subcategories problem cognition, conceptual world retrieval, and model generation. In Response I, 372 cases of modeling for 12 items were categorized into 6 types: valid facets (37.9%), valid facets but failed mathematical manipulation (0.5%), all facets formulated but some facets lacking validity (24.2%), facets partially formulated (11.6%), inadequate conceptual model selection (4.0%), and choosing answer by intuition or guess (14.5%). There were 27 cases that could not be categorized due to lack of further information. Participants showed difficulty in identifying interaction descriptors or applying certain interaction descriptors to causal facets after analyzing the difficulties on modeling by identifying consistent features of participants with same type of model for each item. In addition, some participants randomly selected

familiar conceptual models without considering the problem situation, or applied different system settings to each step of modeling.

According to the number of the correspondent models, the role of the group members, the homogeneity of the model, and the change of the model in the group, the small group interactions were categorized into four patterns such as tutoring, competition, cooperation, and compatibility. A total of 118 small group interactions were tutoring (54.2%) in which the tutee unilaterally accepts the model of the tutor, competition (17.8%) in which participants who generated different models evaluate each other's models, cooperation (10.1%) in which participants modify the model jointly by sharing information on problem situations and models or attempting to construct new models, and compatibility (17.8%) in which participants identify model similarities and differences between correspondent models.

Finally, the effect of small group interaction to participants' modeling especially on problem situation recognition, conceptual world and model was analyzed. Participants in the tutoring and competition were found to recognize the model or to correct the problem situation recognition in the process of accepting or evaluating the peer's model. However, if a participant with deficit or contradiction on the conceptual world passively accepted only the resultant model of the peer without interaction in the conceptual world, then it appeared that the internal consistency between problem situation recognition, conceptual world, and the model was lacking. Cooperation had different effects on modeling according to group characteristics. If there were correspondent model generating participants in the group, then the group shared the problem situation recognition and modified the existing model. However, in the case wherein the group was only composed of the participants who could not generate the correspondent model, the model generation and the solution failed in most cases. In the compatibility, the groups which participants only check the others' model without conceptual discussion about the similarity and the difference of the model were more than 75%. It can be interpreted that most participants did not experience the expansion of model and conceptual world in compatibility. In conclusion, peer instruction activities can help students to modify or create their own models through small group interaction such as accepting,

evaluating, and sharing the problem situation recognition or peer models. However, if either the participants' understanding of the conceptual model is insufficiently understood or the conceptual interactions are omitted, then only the result of the model and the fragmentary knowledge are unilaterally transmitted, and the small group interaction is likely to only transfer mathematical calculation processes. Thus, it is important to understand the link between the model and the conceptual world through active interactions in order for peer instruction activities to meaningfully contribute to students' learning of physics. Further research is needed to encourage students not only pay attention to the combination of formulas and calculations but also to discuss the physical meaning and theories of their work.

**keywords : Physical problem solving, Modeling, Small group
interaction, Mechanics**

Student Number : 2012-30408